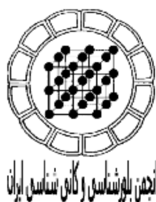
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و نهم، شمارهٔ دوم، تابستان ۱۴۰۰، از صفحهٔ ۲۶۹ تا ۲۸۸



بررسی‌های کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میانبارهای سیال در کانسار مس آق‌دره، منطقه طارم، شمال غرب ایران

سیامک صانع‌دوست*[1]، صمد علیپور[1]، مهدی حسینی[2]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۴/۱۴، نسخه نهایی: ۹۹/۶/۱)

چکیده: کانسار مس آق‌دره بخشی از پهنه طارم در ۲۵کیلومتری شمال ابهر است. دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک و پروپلیتیک در منطقه رخداده است و آندزیت‌ها و رگه‌های سیلیسی دربردارنده کانی‌های سولفیدی میزبان کانه‌زایی بوده‌اند. کالکوپیریت و پیریت کانی‌های اصلی درونزاد هستند که با مقادیر کمتر گالن در باطله سیلیسی طلا و نقره را همراهی کرده‌اند. مهم‌ترین کانی‌های برونزاد مالاکیت، آزوریت و گوتیت بوده‌اند. گالن عامل همبستگی سرب و روی بوده و همبستگی مس و آهن با همبرزایی کالکوپیریت و پیریت توجیه‌پذیر است. غنی‌شدگی نسبی عناصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) و عناصر خاکی نادر سبک (LREE) و تهی‌شدگی نسبی عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) تشکیل ماگمای اولیه در محیط فرورانشی، آلایش آن با پوسته قاره‌ای و ایجاد سنگ‌های آتشفشانی آهکی-قلیایی را تایید می‌کند. برپایه ریزدماسنجی میانبارهای دوفازی مایع+بخار (L+V)، کانی‌سازی در دمای ۱۴۰ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد از سیالی با شوری ۰/۷تا۱۱ درصد وزنی معادل NaCl از طریق جوشش، آمیختگی و سردشدگی رخداده‌است. کانسار آق‌دره از نوع فراگرمایی رگه‌ای است و احتمال کانی‌سازی مس پورفیری در بخش‌های زیرین منطقه وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: *کانه‌زایی؛ زمین‌شیمی؛ میانبار سیال؛ مس؛ آق‌دره؛ طارم.*

مقدمه

ایران از نظر کانه‌زایی مس، از پتانسیل خوبی برخوردار است. کانسارهای مهم کشور بیشتر در شش منطقه ساختاری ارومیه-دختر، البرز غربی، کویر سبزوار، سبلان، لوت و مکران واقع هستند [۱]. مهم‌ترین منابع مس ایران کانسارهای سولفیدی و اکسیدی هستند [۲]. هرچند منطقه آتشفشانی ارومیه-دختر مهم‌ترین پهنه کانسارسازی مس و میزبان بزرگترین کانسارهای مس پورفیری است [۳]، ولی وضعیت ویژه زمین‌شناسی ساختاری و حضور دگرسانی‌های گسترده و گسترش توده‌های نفوذی اسیدی تا حدواسط در پهنه طارم سبب شده است تا این منطقه از مناطق مستعد برای کشف پتانسیل‌های معدنی و دربرگیرنده نهشته ها و کانسارهای فلزی، به ویژه مس باشد [۴، ۵]. وجود آثار معدنی متعدد و کارگاه‌های کوچک و بزرگ زاج‌پزی و سرباره‌های ذوب مس و همچنین وجود نهشته‌ها و معادن متروک و فعال مس، سرب و روی در پهنه طارم (مانند معادن کردکندی، گلیجه، دهنه، کوهیان، علی آباد موسوی، شاه علی بیگلو، سنجده، چرمالو، مس بولاغی، زه‌آباد، یمقان، شیزر، چودرچای و نهران) بیانگر سابقه طولانی معدن‌کاری در این مناطق است [۵]. پژوهش های انجام شده در پهنه طارم، رخدادها و کانه‌زایی‌های متعددی از جمله کانسار فراگرمایی باریک‌آب [۶]، نهشته مس ماری [۷]، کانسار فراگرمایی با سولفیدشدگی متوسط گلوجه [۸] و کانسار مس - طلای خلیفه‌لو [۹] را در این منطقه معرفی نموده‌اند. از معروف‌ترین کانسارهای مس طارم می‌توان به سه کانسار چیزه، آق‌دره و

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۱۳۴۱۰۸۱۴، نمابر: ۰۱۳۴۲۲۳۰۱۶۵، پست الکترونیکی: s_sanedoust@yahoo.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

یمقان اشاره کرد [۲]. کانسار مس آق‌دره قسمتی از پهنه طارم واقع در گستره نقشه چارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ زنجان [۱۰] و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ابهر است. منطقه مورد بررسی در گستره جغرافیایی‌′۲۰ °۴۹ تا ′۲۲ °۴۹ عرض شمالی و ′۱۹ °۳۶ تا ′۲۱ °۳۶ طول شرقی، در ۸۵ کیلومتری شرق زنجان و ۲۵ کیلومتری شمال ابهر واقع است. از نخستین بررسی های انجام‌شده در منطقه تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ زنجان توسط هیراياما و همکاران بوده است [۱۱]. چند گزارش در مورد نهشته‌ها و کانسارهای منطقه طارم منتشر شده [۱۲-۱۴] و دگرسانی‌های منطقه توسط پیروان [۱۵، ۱۶] بررسی گردیده است. کانی‌سازی‌هاي سرب، روي و مس مناطق شمال غرب زنجان و خاورمیانه توسط حاج علیلو [۱۷] و زمین‌شناسی اقتصادی کانسار چندفلزی طارم توسط جهاندیده کاظم‌پور [۱۸]، بررسی شده است. در این پژوهش، ویژگی‌های کانه‌زایی، زمین‌شیمی و شرایط دما و شوری سیال کانه‌ساز کانسار مس آق‌دره بررسی و نوع و عمق تشکیل کانسار تعیین شده است. یافته های این پژوهش می‌تواند عوامل موثر در توزیع زمانی و مکانی را برای بررسی های بعدی در پهنه طارم معرفی کند و به عنوان نمونه‌ای برای پی جویی‌های آتی در نظر گرفته شود.

روش بررسی

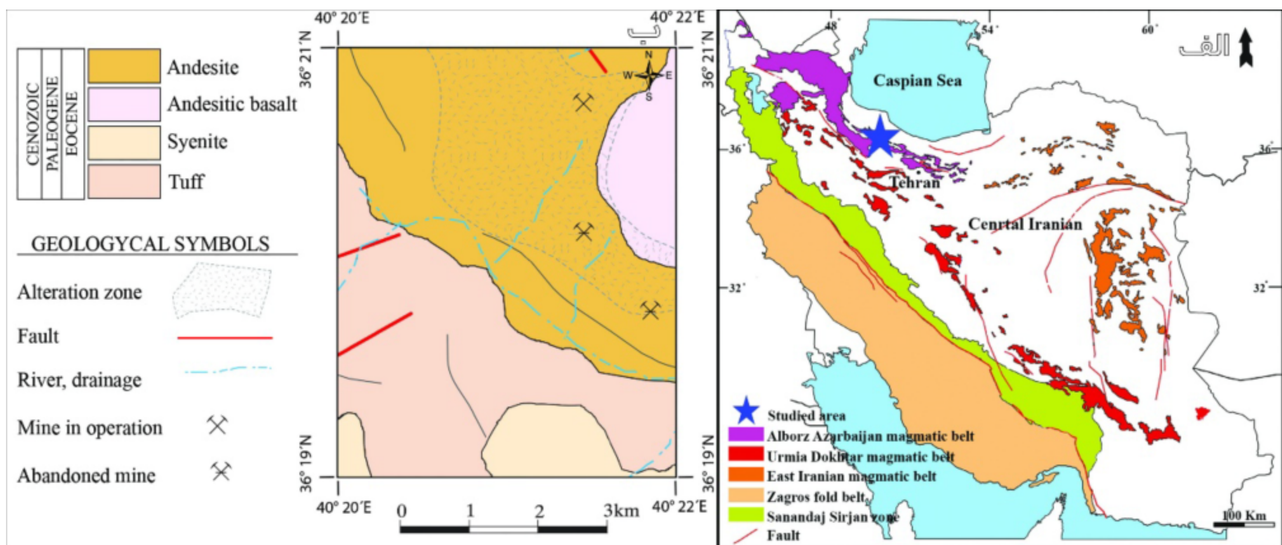
در این پژوهش، بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در بخش صحرایی، با پیمایش منطقه، از واحدهای سنگی، گستره‌های دگرسانی و کانی‌سازی‌ها نمونه‌برداری شد. در بخش آزمایشگاهی، نخست ۲۲ مقطع نازک از نمونه‌های سنگی دگرسان و غیردگرسان و ۱۸ مقطع صیقلی از رگه‌های کانه‌زا برای بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌نگاری تهیه شده و در آزمایشگاه‌های دانشگاه تربیت مدرس تهران و دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) قزوین، با میکروسکوپ قطبشی با نور عبوری و بازتابی بررسی شدند. سپس، برای تعیین فازهای کانیایی و شناسایی دقیق ترکیب شیمیایی کانی‌ها، تعداد ۱۳ نمونه به روش پراش پرتو ایکس؛ (XRD) با دستگاه Philips-Xpert Pro و تعداد ۳ نمونه به روش ریز پردازش الکترونی (EPMA) با دستگاه Cameca SX100 همراه با میکروسکوپ الکترونی BSE بررسی شدند تعیین مقادیر کمّی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب، تعداد ۱۳ نمونه به روش طیف‌سنجی فلئورسانس پرتو ایکس (XRF) با دستگاه Philips-Magicx Pro و ۱۷ نمونه به روش طیف‌سنجی جِرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP MS) با دستگاه Agilent 7900 با توانایی اندازه‌گیری ۵۸ عنصر در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران تجزیه شدند. داده‌های زمین‌شیمی با استفاده از نرم افزار SPSS (بر پایه ماتریس همبستگی پیرسون و تجزیه خوشه‌ای وارد[1] و تغییرات عناصر کمیاب توسط نرم‌افزار GCDKit بررسی گردیدند. همچنین برای بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز، نمونه‌های کوارتزی همزیست کانی‌زایی، که بهترین معرف برای شرایط تشکیل کانی‌ها هستند [۱۹]، از رگه و رگچه‌های سیلیسی کانسار مس آق‌دره انتخاب شده و در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس تهران مقاطع دوبر صیقلی آنها تهیه و سنگ‌نگاری گردید. سپس، تعداد ۷ مقطع انتخاب و در آزمایشگاه ریزدماسنجی مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران، برای ۴۹ میانبار سیال، ریزدماسنجی شد. در این بررسی‌ها، از صفحه‌های منجمدکننده و گرمایشی لینکام مدل THMS 600 استفاده شد که بر میکروسکوپ زایس نصب‌گردیده و با استانداردهای غیرآلی مرک واسنجی شدند. این تجهیزات توانایی اندازه‌گیری دما در گستره ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد را دارند و دقت اندازه‌گیری‌ها با استفاده از ان‌هگزان، برای انجماد تا ۰٫۲± درجه سانتی‌گراد و با استفاده از نیترات سزیم، در برای گرمایش تا ۰٫۶± درجه سانتی‌گراد است. به دلیل احتمال تخریب میانبارهای سیال طی گرمایش، ریزدماسنجی با انجماد آغاز شد. مقادیر شوری و چگالی میانبارهای سیال در سامانه H_2O-NaCl با استفاده از افزونه HokieFlincs- H_2O-NaCl [۲۰، ۲۱] در صفحه‌گسترده اکسل محاسبه شد.

زمین‌شناسی و سنگ‌نگاری

بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران، پهنه طارم در بخش غربی و مرکزی کمربند ماگمایی البرز-آذربایجان [۲۲، ۲۳] و یا در بخش غربی البرز مرکزی [۲۴] جای دارد (شکل ۱-الف). پهنه طارم یک کمان ماگمایی مرکب از نهشته‌های آتشفشان‌های ائوسن بوده که در معرض توده‌های نفوذی الیگوسن قرار گرفته [۸، ۲۳] (شکل ۱-ب) و فعالیت گرمابی، برشی و کانی‌زایی در آن گسترش یافته است [۲۳].

1- Ward

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]



شکل ۱ الف) نقشه تقسیمات پهنه‌های ساختاری ایران برگرفته از مراجع [۲۵-۲۷] با تغییرات و جایگاه منطقه مورد بررسی بر آن، ب) نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی بر گرفته از مرجع [۸] با تغییرات.

پهنه طارم دنباله نوار آتشفشانی و نفوذی البرز غربی است [۲۸] که از فعالیت ماگمایی پسابرخورد صفحه عربی و ایران، در کرتاسه پسین ایجاد شده است [۲۹]. نهشته‌های آتشفشانی و آتشفشانی-آواری سازند کرج در پهنه طارم نشان‌دهنده فعالیت آتشفشانی در یک حوضه رسوبی کم‌عمق با فازهای متناوب انفجاری و خروج روانه‌های آندزیتی، داسیتی و بسیار کم ریولیتی است [۴]. سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی با ترکیب غالب حدواسط تا فلسیک و گرایش کلسیمی – قلیایی در کمربند ماگمایی البرز – آذربایجان گسترش بسیاری دارند [۳۰] و میزبان اصلی ذخایر فلزهای پایه و گران‌بها در بسیاری از نقاط هستند [۳۱].

پی‌سنگ تشکیلات منطقه به احتمال بسیار شامل سازندهای با سن پالئوزوییک پسین و کرتاسه است [۳۲]. قدیمی‌ترین واحدهای رخنمون‌یافته، توف‌ها و توفیت‌های معادل سازند کرج با سن احتمالی ائوسن میانی هستند. راستای عمومی این توف‌ها شمال‌غرب – جنوب‌شرق است و شیب آن‌ها بسته به عملکرد ساختارهای زمین‌ساختی تغییر می‌کند. روند این ساختارها متاثر از گسل‌های اصلی رودبار – منجیل در شمال و سلطانیه در جنوب [۲۳] و گسل‌های طولی به نسبت فراوان با روند شمال غرب – جنوب شرق [۳۳] است. درون توف‌های ائوسن در بیشتر محل‌ها، گدازه‌هایی با ترکیب بازالتی تا آندزیتی به صورت بین‌لایه‌ای دیده می‌شوند [۳۴]. در سنگ‌نگاری منطقه، واحدهای سنگی از قدیم به جدید شامل توف‌ها، واحدهای سینیتی، آندزیتی، آندزی‌بازالت و رگه‌های سیلیسی شده هستند که نتایج بررسی آنها در ادامه بیان می‌شود.

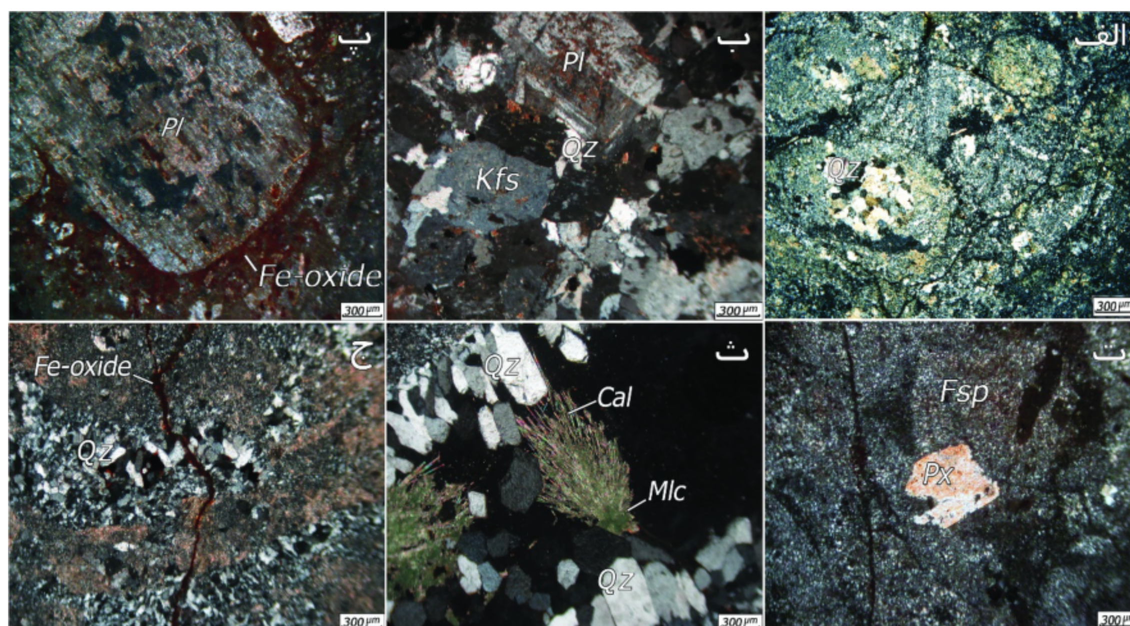
توف به طور گسترده در مرکز منطقه و بیشتر به صورت دگرسان‌شده و همراه با کانی‌زایی وجود دارد. بافت شیشه‌ای جریانی و جوش‌خورده آن گاهی با ترک‌های پرلیتی همراه است (شکل ۲ الف). این واحد آذرآواری بیشتر شامل بلورهای کوارتز و پلاژیوکلاز در زمینه‌ای شیشه‌ای است.

سینیت به طور محدود در جنوب منطقه، با رنگ کِرِم همراه لکه‌های سفید و بافت پورفیری مشخص است. کانی‌های اصلی فلدسپار پتاسیم با فراوانی تقریبی ۷۰ ٪، پلاژیوکلاز با فراوانی حدود ۲۰٪ و هورنبلند با بافت دانه‌ای در سنگ حضور دارند (شکل ۲ ب). کوارتز با فراوانی کمتر از ۵٪ و کانی‌های مافیک با فراوانی حدود ۲٪ به صورت بلورهای ریز با بافت پراکنده‌دانه درون زمینه دیده می‌شوند.

آندزیت فراوان‌ترین سنگ آتشفشانی در شمال منطقه است و رنگ سفید مایل به خاکستری و بافت پورفیری دارد. با این سنگ کانی‌زایی مس همراه است و کانی‌های اصلی آن شامل پلاژیوکلاز و هورنبلند، کانی فرعی آن اِسفن کدر و کانی‌های ثانویه شامل اکسیدهای آهن، اپیدوت و کوارتز هستند. متوسط اندازه بلورهای پلاژیوکلاز ۴۰۰ میکرون است ولی گاهی درشت بلورهای آن تا چند میلی‌متر رشد کرده و بیش از ۸۰٪ درشت بلورهای سنگ را تشکیل داده‌اند (شکل ۲ پ). اکسیدهای آهن با فراوانی حدود ۸٪، به شکل رگچه‌ای، دانه‌پراکنده و گاهی انباشت‌ها پیرامون درشت بلورها جایگزین شده‌اند (شکل ۲ پ).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های کانسار آق‌دره: الف) بلورهای کوارتز در زمینه شیشه‌ای همراه با ترک‌های پرلیتی در توف، ب) فلدسپار پتاسیم و پلاژیوکلاز با بافت دانه‌ای و کوارتز در سینیت، پ) درشت بلور پلاژیوکلاز و اکسیدهای آهنِ لبه آن در آندزیت، ت) زمینه فلدسپار با قالب باقیمانده کانی‌های مافیک پیروکسن در آندزی‌بازالت، ث) مالاکیت شعاعی و کوارتز در رگه‌های سیلیسی و ج) رگچه‌های اکسید آهن که کانی‌ها را قطع کرده‌اند. (Qz: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Fe-oxide: اکسیدهای آهن، Px: پیروکسن،Fsp: فلدسپار، Mlc: مالاکیت، Cal: کلسیت) نشانه‌های اختصاری کانی‌شناسی برگرفته از مرجع [۳۵] است.

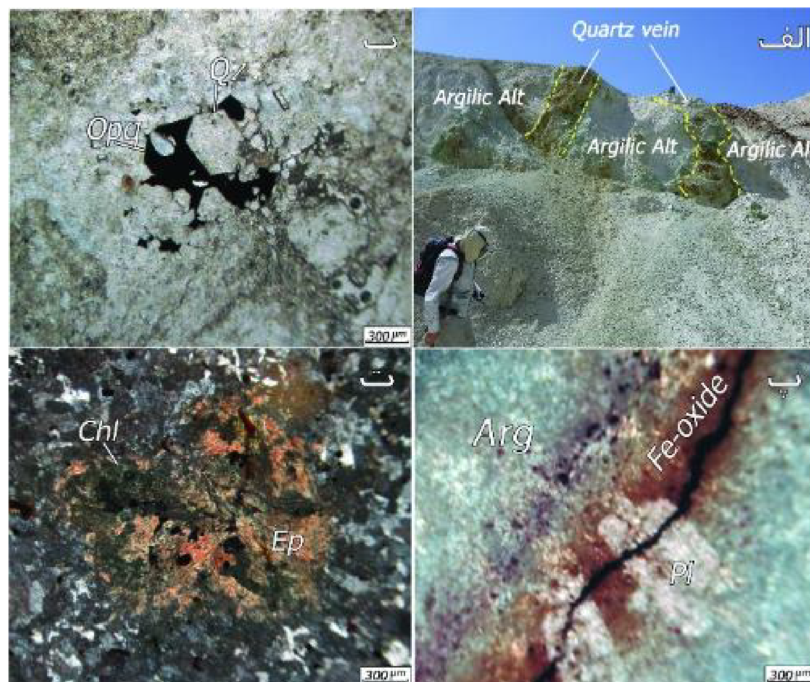
آندزی بازالت با گسترش کم و رنگ خاکستری تیره در شمال شرقی منطقه رخنمون دارد. بلورهای بسیار ریز فلدسپار، کوچکتر از ۵۰ میکرون، بیش از ۹۰٪ سنگ را تشکیل داده و بافت ریزپورفیری به آن داده‌اند (شکل ۲ ت). آثار کانی‌های مافیک مانند پیروکسن با فراوانی حدود ۲٪ زمینه در سنگ به چشم می‌خورند (شکل ۲ ت).

رگه‌های سیلیسی فراوان‌ترین رگه‌های متقاطع در منطقه بوده و دربردارنده کانی‌های مس، کدر و اکسیدهای آهن هستند. کانی‌سازی شعاعی مالاکیت اغلب به همراه بخش‌های سیلیسی دیده می‌شود (شکل ۲ث). رگچه‌هایی از اکسیدهای آهن با فراوانی ۲ تا ۳٪، کانی‌های یاد شده را قطع کرده‌اند (شکل ۲ ج) و توالی سنگ میزبان دگرسان، بلورهای کوارتز ریز، مالاکیت، رگچه‌های کوارتز درشت و رگچه‌های اکسیدی آهن را از قدیم به جدید به نمایش می‌گذارد.

دگرسانی و کانه‌زایی

درویش‌زاده و آسیابانها [۳۶] و حاج علیلو [۳۷] دگرسانی‌های گسترده‌ای را در نواحی مختلف حوزه چندفلزی طارم معرفی کرده‌اند. واحدهای سنگی منطقه در معرض توده‌های نفوذی، سیال های ماگمایی و یا گرمابی دچار دگرسانی‌های سیلیسی، آرژیلیک (شکل ۳ الف) و پروپلیتیک و با اهمیت کمتر، آلونیتی و سریسیتی شده‌اند. از ترکیب یافته های آزمایشگاهی مقاطع نازک و داده های XRD نمونه‌های برداشت شده از پهنه‌های دگرسانی، با مشاهدات صحرایی نتایج زیر برداشت شد.

دگرسانی سیلیسی مهم‌ترین دگرسانی منطقه و در ارتباط با نفوذ سیال‌های گرمابی سرشار از سیلیس، به ویژه در پیرامون رگه‌ها و پهنه‌های برشی است که اغلب به تدریج به هاله دگرسانی آرژیلیک رسیده است و طیف رنگی از خاکستری تا قهوه‌ای دارد. بر اساس نتایج XRD (جدول ۱)، کوارتز کانی اصلی این دگرسانی است و کانی‌های پیریت، ارتوکلاز، ایلیت، مسکویت، کائولینیت، مالاکیت و بیوتیت نیز در آن حضور دارند. در مقطع میکروسکوپی، بلورهای درشت کوارتز توسط بلورهای ریز آن قطع شده‌اند. کانی‌های کدر (به احتمال بسیار پیریت) با فراوانی ۲ تا ۳٪ در فضای بین بلورهای کوارتز دیده می‌شوند و با بلورهای درشت و کاملاً شکل‌دار کوارتز دارای مرز مشترک هستند. بلورهای درشت کوارتز پس از کانی کدر تشکیل شده و درون آن رشد کرده‌اند (شکل ۳ ب).



شکل ۳ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از دگرسانی‌های کانسار آق‌دره و کانه‌زایی در آن‌ها: الف) رگه‌های سیلی و دگرسانی آرژیلیک کنار آن، ب) مرز مشترک کانی کدر (پیریت) با بلور درشت و ششگوشی کامل کوارتز، پ) قالب‌های پلاژیوکلاز در دگرسانی آرژیلیکی که با رگه اکسیدهای آهن قطع شده است، ت) دگرسانی پروپلیتیک شامل اپیدوت و کلریت در زمینه سیلیسی (Argilic Alt: دگرسانی آرژیلیک، Qz: کوارتز، Opq: کدر، Pl: پلاژیوکلاز، Fe-oxide: اکسیدهای آهن، Arg : آرژیلیک، Ep: اپیدوت، Chl: کلریت) نشانه‌های اختصاری کانی‌شناسی برگرفته از مرجع [۳۵] هستند.

جدول ۱ نتایج XRD برخی نمونه‌های کانسار آق‌دره.

شماره نمونه	دگرسانی	کانی‌ها
AG-۰۶	سریسیتی - آرژیلیک	کوارتز+کالکوپیریت+آلونیت+موسکوویت+ پیریت
AG-۱۲	آرژیلیک	کوارتز+هماتیت+ارتوکلاز+کائولینیت
AG-۱۵	پروپلیتیک	کوارتز+آلونیت+ایلیت+کلسیت
AG-۱۶	آرژیلیک - آلونیتی	کوارتز+کلینوکلر+آلونیت+مسکوویت+آناتاز+پیریت
AG-۲۰	آرژیلیک - آلونیتی	کوارتز+کلینوکلر+آلونیت+مسکوویت+پیریت
AG-۲۴	سریسیتی	کوارتز+کالکوپیریت+پیریت
AG-۴۲	سیلیسی	کوارتز+مسکوویت+کائولینیت
AG-۴۴	سیلیسی	کوارتز+روتیل
AG-۴۷	سیلیسی	کوارتز+مالاکیت+بیوتیت
AG-۵۷	سیلیسی	کوارتز+پیریت+اورتوکلاز+مسکوویت+ایلیت
AG-۵۸	سیلیسی - آرژیلیک	کوارتز+پیریت+مسکوویت+ایلیت
AG-۵۹	آرژیلیک	کوارتز+مسکوویت+ایلیت
AG-۶۲	آلونیتی	کوارتز+آلونیت+مسکوویت

دگرسانی آرژیلیک به همراه دگرسانی آلونیتی در مرکز، شرق و جنوب شرق منطقه گسترش یافته و از دگرسانی‌های گرمابی است. این دگرسانی‌ها در پهنه‌های گسلی توف‌های ائوسن ایجاد شده و با عوامل ساختاری کنترل شده‌اند [۳۴]. در لبه دگرسانی سیلیسی منطقه و در مرز بین آن با دگرسانی آرژیلیک بخش محدودی با دگرسانی آرژیلیک پیشرفته وجود دارد که تفکیک آن‌ها از هم دشوار است. همچنین، رخنمون‌های متعددی از کائولن در منطقه دیده شده است. بر

اساس نتایج XRD (جدول ۱)، کانی‌های کوارتز، هماتیت، ارتوکلاز، کائولینیت، آلونیت، مسکویت و ایلیت در این پهنه حضور دارند که وجود آلونیت تاییدی بر دگرسانی آرژیلیک پیشرفته است [۳۸]. در مقطع میکروسکوپی، قالب‌های برجامانده از پلاژیوکلاز دگرسان‌شده که از نشانه‌های دگرسانی آرژیلیک هستند، با رگه‌های اکسید آهن قطع شده است (شکل ۳ پ).

دگرسانی پروپلیتیک: در گدازه‌های آندزیتی و آندزی‌بازالتی منطقه با رنگ سبز روشن تا تیره رخنمون داشته است. این دگرسانی بیشتر در بخش‌های بیرونی پهنه‌های کانه‌زایی منطقه گسترش یافته و محدودکننده مرزهای خارجی سامانه دگرسانی است. کلریت، اپیدوت و کلسیت از کانی‌های مشخصه آن هستند [۳۹]. فراوانی کلریت در نزدیکی رگه‌های سیلیسی منطقه کمتر بوده و با دور شدن از رگه‌ها، بر فراوانی آن افزوده شده که به تدریج جانشین پلاژیوکلاز شده‌است. کانی کلسیت به عنوان یکی از کانی‌های اصلی دگرسانی پروپلیتیک در نتایج XRD سنگ دگرسان (جدول ۱) تشخیص داده شده است. در بررسی مقطع میکروسکوپی، کانی اصلی کلریت و کانی‌های فرعی کدر و اپیدوت در زمینه سیلیسی دیده شده‌اند (شکل ۳ ت).

بررسی‌های کانی‌سازی و کانی‌شناسی

کانی‌سازی اصلی در منطقه به صورت رگه‌هایی در شکستگی به نسبت قائم با راستای شمالی-جنوبی رخ داده است. این رگه‌ها بیشتر سیلیسی هستند و فضای خالی بسیاری از آن‌ها با کانی‌های سولفیدی پُر شده است. بافت پُرکننده فضای خالی از بافت‌های معمول کانی‌سازی فراگرمایی است [۴۰]. از نظر هندسی نیز، شکل رگه‌ای از شکل‌های کانسارهای فراگرمایی است [۴۱]. کانی‌سازی در کانسار مس آق‌دره شامل کانی‌های فلزی و غیرفلزی است که در دو مرحله‌ی درونزاد (اولیه) و برونزاد (ثانویه) شکل گرفته‌اند. در توالی همبرزایی، کانی‌سازی درونزاد خود به دو زیرمرحله قابل تفکیک است. کانی‌های اصلی کالکوپیریت و پیریت در هر دو زیرمرحله‌ی کانی‌سازی اولیه حضور دارند ولی کانی اصلی گالن و کانی‌های باطله باریت و کلسیت فقط در زیرمرحله‌ی دوم ایجاد شده‌اند. در کانی‌سازی برونزاد، کانی‌های اصلی مالاکیت، آزوریت و به مقدار کمتری گوتیت تشکیل شده‌اند. کانی کوارتز به عنوان باطله در همه مراحل کانی‌سازی گسترده شده‌است. کانی‌های اصلی کالکوپیریت و پیریت و کانی باطله کوارتز بیشترین فراوانی نسبی را دارند و کانی‌های باطله کلسیت و باریت با کمترین فراوانی نسبی بخشی از فرایند کانی‌سازی را همراهی کرده‌اند (شکل ۴).

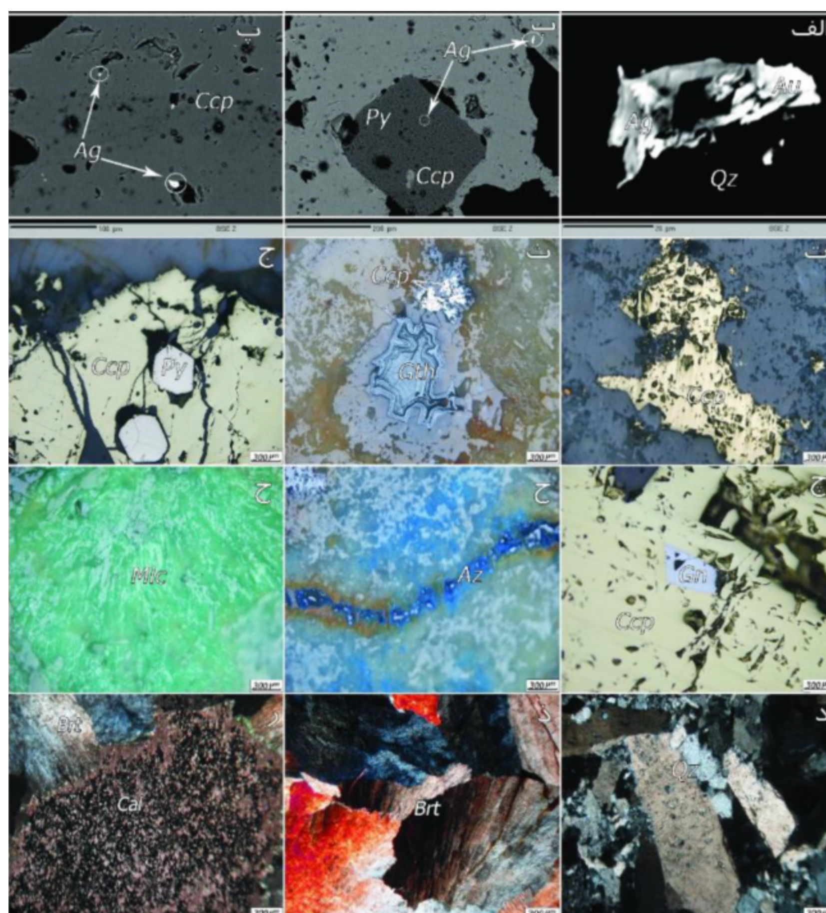
Mineralogy \ Stages		Hypogene: Substage 1	Hypogene: Substage 2	Supergene
Ore	Chalcopyrite	▬▬▬	▬▬▬ - - -	
	Pyrite	▬▬▬	▬▬▬ - - -	
	Galena		▬	
	Malachite			▬▬
	Azurite			▬▬
	Goethite			▬
Gangue	Quartz	▬▬▬	▬▬▬	▬ - - -
	Barite		▬	
	Calcite		▬	

شکل ۴ توالی همبرزایی و فراوانی نسبی کانی‌های کانسار آق‌دره.

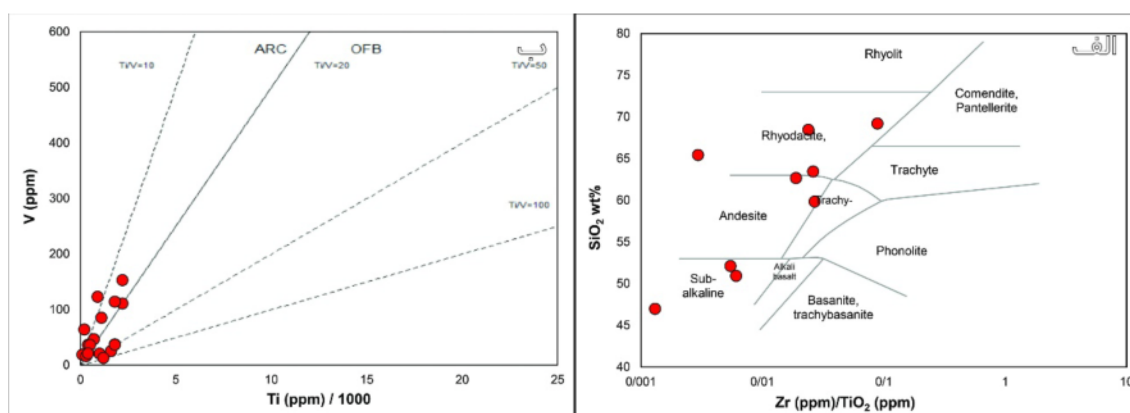
بر پایه نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی شامل بررسی‌های میکروسکوپی مقاطع نازک، ریز پردازش الکترونی (EPMA) و پراش پرتو ایکس، کانه‌های سولفیدی، اکسیدی-هیدروکسیدی، کربناتی و سیلیکاتی در کانسار مس آق‌دره تشکیل شده‌اند. بر اساس تصاویر الکترونی پس پراکنده (BSE) و نتایج EPMA، طلا با اندازه ۲۰ میکرون و با ۵۹ درصد وزنی به صورت پُرکننده حفره ها و شکستگی‌ها در باطله سیلیسی و در کنار ذرات نقره تشکیل شده است (شکل ۵ الف). نقره با ۸۶ تا ۹۱ درصد وزنی، افزون بر باطله سیلیسی، در ساختار کالکوپیریت و پیریت نیز دیده شده است (شکل‌های ۵ ب و پ). در مجموع، کانی‌های کالکوپیریت، پیریت و گالن، ذرات طلا و نقره را در باطله سیلیسی همراهی کرده‌اند. کالکوپیریت نخستین کانی سولفیدی تشکیل‌شده و مهم‌ترین و فراوان‌ترین کانی مس‌دار در کانسار مس آق‌دره است. این کانی اغلب با کانی‌های سولفیدی دیگر (پیریت و گالن) همراه بوده و در مقطع میکروسکوپی، با اندازه‌های مختلف از ۴۰ میکرون تا چند میلی‌متر به صورت لکه‌ای و پُرکننده فضای خالی در زمینه سیلیسی دیده شده‌است (شکل ۵ ت). سیلیسی‌شدن سنگ میزبان، پیش و همزمان با تشکیل کانی‌ها، محیط مناسبی را برای فرایند جانشینی فراهم کرده و بخشی از کانی کالکوپیریت در اثر فرایندهای برونزاد، از لبه و یا مرکز، با مالاکیت، آزوریت و گوتیت جانشین شده است (شکل ۵ ث). پیریت در دو نسل تشکیل شده‌است. نسل اول به صورت خودشکل و دارای لبه‌های کاملاً منظم بوده که با کالکوپیریت‌های با لبه نامنظم همراه هستند، ولی جوان‌تر از آن‌ها ارزیابی می‌شوند (شکل ۵ ج). نسل دوم در تصاویر BSE میکروسکوپ الکترونی و داده‌های EPMA، دارای بلورهایی با اندازه ۲۰ تا ۳۰۰ میکرون، به صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند و کالکوپیریت را در برگرفته‌اند (شکل ۵ ب). گالن به صورت پُرکننده فضای خالی و با شکستگی‌های مثلثی آشکار در سنگ میزبان آن شناسایی شده است. این کانی با فراوانی کم و اندازه ۵ تا ۱۰۰ میکرون با کالکوپیریت همراهی می شود ولی لبه آن از کالکوپیریت منظم‌تر بوده و پس از آن تشکیل شده است (شکل ۵ چ). آزوریت و مالاکیت فراورده دگرسانی کالکوپیریت هستند که در اثر واکنش مسِ آزادشده با کمپلکس کربناتی موجود در محیط به صورت کربنات‌های مس آب‌دار نهشته شده و حفره‌ها و فضاهای خالی را پر کرده‌اند. آزوریت با بافت شکافه پُرکن و رگچه‌ای و رنگ آبی لاجوردی در منطقه قابل تشخیص بوده و نسبت به دیگر کانی‌های مس‌دار، فراوانی کمتری داشته است (شکل ۵ ح). مالاکیت به صورت پراکنده و یا رگه‌ای، به فراوانی در درون سنگ میزبان آن انباشته شده و بافت رشته‌ای آن نشان‌دهنده تشکیل در دمای پایین است (شکل ۶ خ). این کانی در اثر هوازدگی و آزاد شدن مس از ساختار کانی‌های مس‌دار اولیه تشکیل شده و دلیلی بر وجود پهنه برونزاد اکسیدی در منطقه بوده که باعث افزایش عیار مس شده است. گوتیت نیز در نتیجه اثر فرآیندهای اکسایش بر کانی‌های سولفیدی و تشکیل هیدروکسید آهن در لبه‌ها و راستای شکستگی‌های آن‌ها ایجاد شده است. اکسایش سولفیدها وابسته به بالاآمدگی سنگ‌ها، آب و هوا، ترکیب سنگ اولیه (به ویژه مقدار پیریت) و ساختار سنگ میزبان از نظر گسل‌خوردگی و شکستگی است. بالاآمدگی سنگ‌ها، به علت فرسایش یا زمین‌ساخت، سبب شده است تا پهنه‌های سولفیدی بخش زیرین در معرض واکنش با محلول‌های هوازده‌کننده اکسایشی قرار گیرند [۴۲]. در مقطع میکروسکوپی، کالکوپیریت دستخوش هوازدگی شده و در حال تجزیه‌شدن به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن بوده و گوتیت با بافت گل کلمی جانشین آن‌ها شده است (شکل ۵ ث).

کانی‌های باطله منطقه شامل کوارتز، باریت و کلسیت هستند. اصلی‌ترین کانی باطله، کوارتز بوده که بر اساس اندازه بلورها، در دو دسته ریزبلور و درشت‌بلور تقسیم شده است [۴۳، ۴۴]. کوارتز به صورت نهان‌بلور تا بلورهای خودشکل و بسیار درشتِ روشن، سفید و یا خاکستری در رگه و رگچه‌های سیلیسی و سیمان گرمابی متبلور شده است (شکل‌های ۲ ب، ۳ ب و ۵ د). بلورهای درشت کوارتز در مقطع میکروسکوپی بلورهای ریز آن را قطع کرده‌اند و دو نسل متفاوت سیلیسی‌شدن را نشان می‌دهند (شکل ۵ د). نسل اول کوارتز به صورت نهان‌بلور تا ریزبلور در زمینه سنگ کوچکتر از ۲۰ میکرون است (شکل ۲ ب) و نسل دوم، به صورت بلورهای خودشکل و بسیار درشت در مرکز رگه‌های سیلیسی با اندازه بیش از ۳۰۰ میکرون متبلور شده‌اند (شکل‌های ۳ ب و ۵ د). باریت در مقطع میکروسکوپی به صورت کانی‌های ریز تا بسیار درشت و کشیده با بافت شعاعی، بادبزنی و پَرمانند تبلور یافته است (شکل ۵ ذ). کلسیت در مقطع میکروسکوپی به دو صورت درشت‌بلور و توده های دانه‌ای، با بافت شکافه‌پُرکن، باریت را همراهی کرده است (شکل ۵ ر). حضور کلسیت در سامانه‌های گرمابی به غلظت بالای CO_2 که برای انتقال طلا به صورت کمپلکس سولفیدی بسیار اهمیت دارد نسبت داده می‌شود [۵].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی BSE (الف تا پ) و تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک (ت تا ر) کانی‌سازی در کانسار آق‌دره: الف) ذرات طلا و نقره در زمینه سیلیسی، ب) ذرات نقره در بلور شکل‌دار پیریت به همراه کالکوپیریت، پ) ذرات کوچک نقره در کالکوپیریت، ت) کالکوپیریت لکه‌ای در فضای خالی سنگ میزبان سیلیسی، ث) کانی گوتیت با بافت کلوفرم حاصل از تجزیه کالکوپیرت اولیه، ج) پیریت خودشکل با حاشیه کاملاً منظم به صورت شکافه‌پُرکن در کالکوپیریت، چ) گالن شکافه‌پرکن با شکستگی مثلثی واضح همراه کالکوپیریت، ح) آزوریت رگچه‌ای، خ) مالاکیت رشته‌ای، د) بلورهای بسیار درشت کوارتز در رگه سیلیسی که بلورهای ریز را قطع کرده است، ذ) بلورهای بسیار درشت باریت به شکل بادبزنی، ر) بلور درشت کلسیت در فضای بین کانی‌های باریت. (Au: طلا، Ag: نقره، Qz: کوارتز، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Gth: گوتیت، Gn: گالن، Az: آزوریت، Mlc: مالاکیت، Brt: باریت، Cal: کلسیت) علایم اختصاری کانی‌شناسی برگرفته از مرجع [۳۵].



شکل ۶ الف) نمودار رده‌بندی سنگ‌های آذرین کانسار آق‌دره بر پایه درصد وزنی SiO_2 نسبت به مقادیر Zr/TiO_2 [۴۵]، ب) نمودار تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آذرین کانسار آق‌دره بر اساس مقادیر عناصر کمیاب V نسبت به Ti [۴۶]. (ARC: کمان‌های آتشفشانی و OFB: بازالت کف اقیانوسی).

زمین‌شیمی

تجزیه زمین‌شیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر ابزار توانمندی برای بررسی کانی‌سازی‌های با خاستگاه گرمابی است که به منظور تشخیص چگونگی شکل‌گیری و تعیین منبع سیال‌های کانسارساز در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی انجام می‌شود [۴۷]. در بررسی‌های زمین‌شیمیایی، چگونگی پراکندگی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب در واحدهای سنگی مختلف و رگه‌های کانی‌سازی و همچنین ارتباط و همبستگی این عناصر مد نظر است. با این روابط می‌توان تا حدی به محیط و فرآیندهای موثر در تشکیل کانسارها پی برد [۴۸]. برای تعیین به ویژگی‌های زمین‌شیمیایی کانسار آق‌دره، از رخنمون‌های سطحی و ترانشه‌ها نمونه‌برداری شده و رفتار عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر بر پایه XRF و ICP-MS برای نمونه‌هایی از کان‌سنگ با کمترین هوازدگی بررسی شد. نتایج تجزیه‌ها در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

چنانکه در جدول ۲ دیده می شود، مقدار SiO_2 سنگ‌های آتشفشانی منطقه ۴۶٫۹۸ تا ۷۸٫۰۲ درصد وزنی است. مقدار Al_2O_3 و K_2O این سنگ‌ها نیز در حد متوسط و به ترتیب بین ۲٫۶۱ تا ۳۲٫۱۲ و ۰٫۱۹ تا ۵٫۳۹ درصد وزنی است. CuO و Fe_2O_3 به ترتیب مقادیری کمتر از ۰٫۰۱ تا ۱۲٫۳۹ درصد وزنی و بین ۱٫۴۴ تا ۱۶٫۵۲ درصد وزنی را دارند (جدول ۲).

مقادیر مس از ۳۲٫۵۱ تا ۸۴۲۷۰ گرم در تن متغیر بوده (جدول ۳) که بیشتر مربوط به حضور کانی‌های اولیه مس‌دار مانند کالکوپیریت و کمتر، کانی‌های ثانویه مس‌دار مانند مالاکیت و آزوریت است. مقدار نقره که به صورت آزاد و در ساختار گالن، کالکوپیریت و پیریت تمرکز داشته و با درنظر گرفتن شعاع یونی، امکان جانشینی با سرب را دارد ۱ تا ۲۸٫۷۴ گرم در تن اندازه گیری شده است. نتایج نشان داد که مقدار سرب و روی به ترتیب ۱۰٫۶۳ تا ۳۵۸۸ گرم در تن و ۱۵٫۰۲ تا ۴۷۳٫۳۰ گرم در تن است (جدول ۳). مقادیر بالای سرب با کانی گالن در ارتباط بوده و مقادیر روی به انباشت اکسیدهای روی و به ندرت کانی‌های اولیه آن مانند اسفالریت وابسته بوده است.

جدول ۲ نتایج تجزیه طیف‌سنجی فلئورسانس پرتو ایکس (Nd : زیر حد تشخیص دستگاه ، DL : حد تشخیص).

شماره نمونه	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	Fe_2O_3	MnO	SO_3	P_2O_5	Na_2O	K_2O	CuO
AG-۰۶	۷۸٫۰۲	۰۹٫۲۷	۰٫۱۶	Nd	Nd	۰۳٫۳۱	Nd	۰۴٫۷۲	Nd	Nd	۰٫۵۱	۱٫۶۴
AG-۱۲	۴۶٫۹۸	۳۲٫۱۲	۰٫۱۸	Nd	۰٫۴۷	۱۶٫۵۲	Nd	۰٫۴۳	Nd	Nd	۱٫۰۹	Nd
AG-۱۵	۶۵٫۴۳	۲۴٫۶۶	۰٫۱۴	Nd	۰٫۴۱	۰۲٫۵۸	Nd	۰۲٫۳۳	Nd	Nd	۱٫۳۷	۰٫۱۷
AG-۱۶	۵۰٫۹۳	۲۹٫۱۹	۰٫۱۰	۱٫۷۵	۰٫۶۱	۰۹٫۲۱	Nd	۰۱٫۷۵	Nd	Nd	۱٫۹۸	۰٫۶۵
AG-۲۰	۵۲٫۱۰	۲۹٫۷۳	Nd	۱٫۷۱	۰٫۶۱	۰۷٫۶۳	Nd	۰۲٫۲۳	Nd	Nd	۱٫۸۰	۰٫۶۴
AG-۲۴	۴۹٫۲۳	۰۲٫۶۱	Nd	Nd	Nd	۱۲٫۸۷	Nd	۲۱٫۶۳	Nd	Nd	۰٫۱۹	۱۲٫۳۹
AG-۴۲	۶۹٫۱۹	۱۹٫۰۸	۰٫۱۶	Nd	Nd	۰۴٫۳۱	Nd	۰٫۵۶	Nd	Nd	۱٫۳۶	۳٫۴۲
AG-۴۴	۷۷٫۰۶	۰۸٫۶۶	۰٫۴۲	Nd	Nd	۰۷٫۳۰	Nd	۰٫۲۲	Nd	Nd	۰٫۴۶	۲٫۰۷
AG-۴۷	۷۲٫۶۲	۱۱٫۱۳	۰٫۵۴	Nd	Nd	۰۶٫۵۲	Nd	۰٫۱۷	Nd	Nd	۰٫۶۰	۵٫۹۶
AG-۵۷	۶۳٫۴۴	۲۱٫۸۴	Nd	۰٫۷۰	۰٫۳۰	۰۲٫۵۰	Nd	۰۲٫۲۷	Nd	Nd	۵٫۵۸	Nd
AG-۵۸	۵۹٫۸۳	۲۵٫۸۶	Nd	۰٫۹۲	۰٫۳۶	۰۳٫۲۸	Nd	۰۲٫۶۷	۰٫۱۵	Nd	۴٫۹۰	Nd
AG-۵۹	۶۸٫۴۴	۲۳٫۱۴	۰٫۲۰	۰٫۸۴	۰٫۳۸	۱٫۵۴	Nd	۰٫۱۹	Nd	Nd	۳٫۶۱	Nd
AG-۶۲	۶۲٫۶۶	۲۲٫۷۲	۰٫۱۴	Nd	۰٫۳۴	۱٫۴۴	Nd	۰۴٫۲۷	۰٫۱۷	Nd	۵٫۳۹	Nd
DL٪	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

جدول ۳ یافته های طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (Nd : زیر حد تشخیص دستگاه ، DL :حد تشخیص)

شماره نمونه	Ag	Cu	Pb	Zn	Sb	As	Bi	Fe	Cd	Cs	Rb	Ba	Th	U	Nb
AG-۰۶	۱۴٫۸	۱۲۶۷۰	۱۰۳	۳۳٫۸۱	۵٫۰۶	۲٫۳۳	۲٫۴۸	۰٫۱	Nd	۱۳	۴۹٫۹۵	۱٫۱۲	۱٫۲۲	۲٫۲۸	۱۴٫۸
AG-۱۲	۱٫۴۵	۸۴۴٫۲	۵۸٫۳۴	۳۹٫۹۵	۲۱٫۴۱	Nd	۸٫۶۸	Nd	Nd	۱۵٫۴۷	۲۱۹٫۳	Nd	Nd	۳٫۶۶	۱٫۴۵
AG-۱۵	۲٫۴۵	۱۴۳۰	۱۳۳٫۹	۳۶٫۸۸	۸٫۲۳	Nd	۱٫۶	Nd	۲	۱۷٫۲۵	۲۲٫۹	Nd	۱٫۱۳	۲٫۷۳	۲٫۴۵
AG-۱۶	۴٫۶۱	۵۷۳۷	۱۱۱	۱۲۳٫۱	۵٫۲۴	Nd	۴٫۵۶	۰٫۱۵	۲٫۱۶	۸٫۲۱	۳۹٫۸۸	Nd	۲٫۳۶	۶٫۲۸	۴٫۶۱
AG-۲۰	۳٫۴۵	۴۰۵۳	۱۱۲٫۶	۱۱۰	۶٫۷۳	Nd	۴٫۰۷	۰٫۱۶	۲٫۵۷	۱۷٫۹۱	۵۶٫۱۶	Nd	۲٫۲۱	۵٫۲۴	۳٫۴۵
AG-۲۴	۲۵٫۰۱	۸۴۲۷۰	۲۳۹٫۷	۲۶٫۶۹	۳٫۷۸	۵٫۲۷	۹٫۶۱	۰٫۴۹	Nd	۴٫۴۸	۱۱٫۴۷	Nd	Nd	Nd	۲۵٫۰۱
AG-۲۶	۶٫۵۳	۱۱۵۲۸	۲۱۸٫۶	۳۵	۱	۱	۱٫۹۵	۰٫۱	۴٫۰۲	۳۴٫۳	۱۱۵٫۷	۲٫۹۳	۲٫۰۸	۷٫۶۶	۶٫۵۳
AG-۴۲	۲۴٫۱۳	۱۷۰۸۰	۵۷۲٫۸	۳۰۹٫۲	۲۰٫۸۳	۶٫۵۳	۲٫۷۲	۳٫۴۱	۱٫۶	۲۷٫۹۷	۵۱۰٫۲	۱٫۳۹	۳٫۸۱	۲٫۹۲	۲۴٫۱۳
AG-۴۴	۲۸٫۷۴	۱۰۷۹۰	۳۵۸۸	۴۷۳٫۳	۲۴٫۵	۱۸٫۲	۳٫۳۴	۳٫۶۲	Nd	۴٫۵۴	۷۹۷٫۵	۲٫۷۵	۵٫۲۶	۳٫۴۴	۲۸٫۷۴
AG-۴۶	۳٫۱۳	۶۷۰۱٫۵	۲۰۲۹	۳۶۱	۲٫۲۴	۴٫۷۶	۳٫۱۷	۰٫۳۱	۱	۱۷٫۷۵	۱۳۵٫۳	۱٫۶۳	۲٫۷۹	۱۲٫۷۳	۳٫۱۳
AG-۴۷	۲۵٫۴۱	۲۸۴۹۰	۳۲۷٫۴	۲۴۵٫۳	۲۱٫۹۲	۱۱٫۷	۳٫۷۱	۰٫۹۷	Nd	۱۱٫۸۹	۳۹٫۹۷	Nd	۳٫۶	۱٫۷	۲۵٫۴۱
AG-۵۱	۱٫۴۹	۱۱۰٫۸۵	۲۹٫۲۹	۴۳٫۹	۱	۱	۰٫۵۶	۰٫۱	۱	۵٫۰۳	۹۶٫۴۹	۲٫۲۶	۱٫۴۵	۲۴٫۹۵	۱٫۴۹
AG-۵۷	Nd	۳۵۴٫۶	۱۸٫۶۴	۱۹٫۷۵	۱۲٫۹	Nd	۱٫۸۴	Nd	۱٫۷۷	۱۳۱٫۷	۳۱۶٫۲	۲٫۷۴	۱٫۹۲	۱۳٫۳۹	Nd
AG-۵۸	Nd	۵۰۶	۱۰٫۶۳	۲۲٫۶۵	۲۷٫۵۶	Nd	۲٫۶۷	Nd	۱٫۹۴	۶۵٫۳۳	۱۴۶	۱٫۶۲	۳٫۸۷	۱۱٫۷۵	Nd
AG-۵۹	۱٫۰۹	۶۳۵٫۶	۴۱٫۴۳	۳۱٫۰۷	۱۱٫۴۷	Nd	۰٫۹۲	Nd	۲٫۶۷	۶۳٫۵۹	۶۹٫۸۵	۲٫۷۷	۱٫۵۳	۹	۱٫۰۹
AG-۶۲	Nd	۱۳۰٫۲	۱۵٫۵۷	۱۵٫۰۲	۳۸٫۰۳	Nd	۰٫۵۴	Nd	Nd	۵۲٫۹۴	۱۸۸٫۹	۱٫۹۵	۱٫۰۹	۸٫۹۸	Nd
AG-۶۵	۱	۳۲٫۵۱	۱۶٫۳۷	۱۹٫۸۱	۱٫۳۷	۱	۰٫۱	۰٫۱	۱	۱۰٫۳۴	۱۶٫۷۵	Nd	Nd	۴٫۷	۱
DL	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۰٫۱ppm	۰٫۱٪	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm

شماره نمونه	K	La	Ce	Pr	Sr	P	Nd	Zr	Sm	Eu	Ti	Dy	Y	Yb	Lu
AG-۰۶	۰٫۵۱	۸٫۹۶	۲۲٫۵۱	۱٫۲۲	۲۴٫۶۷	۰٫۰۳	۶٫۳۲	Nd	۱٫۳۳	Nd	۰٫۰۷	۲٫۱	۱۰٫۳	۱٫۳۱	Nd
AG-۱۲	۱٫۰۴	Nd	۰٫۷۷	Nd	۲۹٫۳۴	۰٫۰۳	Nd	۶٫۱۳	Nd	Nd	۰٫۲۲	Nd	Nd	Nd	Nd
AG-۱۵	۰٫۹۲	Nd	۱۱٫۳۴	Nd	۱۸٫۱۴	۰٫۰۲	Nd	۱۲٫۱	Nd	Nd	۰٫۱۱	Nd	Nd	Nd	Nd
AG-۱۶	۱٫۱۱	Nd	۰٫۵۹	Nd	۲۷٫۹۳	۰٫۰۲	Nd	۳۷٫۱	Nd	Nd	۰٫۲۲	Nd	Nd	Nd	Nd
AG-۲۰	۱٫۱۹	Nd	۱۹٫۷۲	Nd	۴۷٫۶۸	۰٫۰۲	۱٫۰۶	۳۳٫۳	Nd	Nd	۰٫۱۸	Nd	Nd	Nd	Nd
AG-۲۴	۰٫۱۲	۱۳٫۵	۲۳٫۸۱	۲٫۳۹	۱۰	۰٫۱۱	۱۲٫۲	Nd	۲٫۵۷	Nd	۰٫۰۱	۱٫۰۸	۴٫۱۹	Nd	Nd
AG-۲۶	۲٫۷۹	۱۰٫۷	۲۴٫۲۵	۳٫۱۶	۸۹٫۴۹	۰٫۰۶	۱۷٫۲	۷٫۱۷	۳٫۴۶	Nd	۰٫۰۹	۱٫۱۴	Nd	Nd	Nd
AG-۴۲	۰٫۹۵	۹٫۷۷	۵۷٫۰۵	۱٫۹۹	۲۵٫۶۶	۰٫۰۴	۹	۸٫۸۷	۱٫۶۱	Nd	۰٫۰۴	Nd	۲٫۹۶	Nd	Nd
AG-۴۴	۰٫۱	۲۴٫۸	۶۰٫۶۹	۳٫۹۳	۳۵٫۸۳	۰٫۰۴	۱۶٫۴	Nd	۲٫۸۸	Nd	۰٫۰۳	۱٫۸۷	۱۰٫۴	۱٫۱۶	Nd
AG-۴۶	۱٫۲۵	۱۴٫۸	۲۹٫۵۸	۲٫۵۵	۲۴٫۶۵	۰٫۰۲	۱۴٫۷	۸٫۹۸	۱٫۵	Nd	۰٫۰۴	۱٫۰۴	Nd	Nd	Nd
AG-۴۷	۰٫۳	۷٫۱۱	۱۲٫۹۴	۱٫۰۸	۱۲٫۲۴	۰٫۰۵	۴٫۷۹	Nd	Nd	Nd	۰٫۰۵	۱٫۰۵	۷٫۶۸	Nd	Nd
AG-۵۱	۰٫۱	۶٫۹۳	۹٫۸۳	۱	۲۴٫۶۱	۰٫۰۱	۷٫۲	۱۱٫۲	۱٫۰۲	Nd	۰٫۱۲	۱	Nd	Nd	Nd
AG-۵۷	۴٫۶۴	۴٫۷۱	۲۹٫۸۶	۱٫۰۱	۱۹۸٫۷	۰٫۰۳	۴٫۸۲	۷۸٫۶	Nd	Nd	۰٫۱۶	Nd	۳٫۱۶	Nd	Nd
AG-۵۸	۲٫۷۲	۲٫۹۸	۳۸٫۱۹	Nd	۵۳۴٫۲	۰٫۰۵	۳٫۱۲	۹۷	Nd	Nd	۰٫۱۸	Nd	۲٫۴۲	Nd	Nd
AG-۵۹	۳٫۱۳	۴٫۶	۴۶٫۴۸	۱	۳۰۸٫۳	۰٫۰۳	۴٫۵۲	۹۱	Nd	Nd	۰٫۱	Nd	۲٫۹۶	Nd	Nd
AG-۶۲	۳٫۰۷	۱٫۱۶	۱٫۹۱	Nd	۴۰۱٫۹	۰٫۰۵	۱٫۲۴	۶۴٫۴	Nd	Nd	۰٫۱۸	Nd	۱٫۵۵	Nd	Nd
AG-۶۵	۸٫۵۵	۱٫۵۱	۱	۱	۱۷۱٫۳	۰٫۰۳	۲٫۶۳	۲٫۱۲	۱٫۱۷	Nd	۰٫۰۲	۱	Nd	Nd	Nd
DL	۰٫۱٪	۱ppm	۰٫۱ppm	۱ppm	۱ppm	۰٫۰۱٪	۱ppm	۵ppm	۱ppm	۱ppm	۰٫۰۱٪	۱ppm	۱ppm	۱ppm	۱ppm

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

در نمودار درصد وزنی SiO_2 نسبت به Zr/TiO_2 [۴۷] برای رده‌بندی ژئوشیمیایی، نمونه‌ها در گستره بازالت‌های نیمه قلیایی، آندزیت، ریوداسیت و داسیت قرار دارند (شکل ۶ الف). تمایل ترکیب بخشی از سنگ‌ها به سمت ریوداسیت و داسیت به دلیل بالا بودن مقدار سیلیس در سنگ‌ها یا اسیدی بودن شیشه‌ی موجود در زمینه‌ی آن‌هاست [۴۹]. پهنه‌ی زمین‌ساختی سنگ‌های آتشفشانی بر پایه نمودار Ti نسبت به V [۴۶]، شناسایی شدند. به دلیل بی‌تحرکی عناصر V و Ti از نظر زمین شیمیایی در سنگ‌های دگرسان، از آن‌ها برای این منظور استفاده شده است [۴۶]. بر این اساس، نمونه‌های سنگی کانسار آق‌دره در بیشتر در گستره کمان ماگمایی قرار دارند (شکل ۶ ب).

مقادیر ۹ عنصر کانه‌ساز براساس داده‌های ICP-MS (جدول ۳) با نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل آماری شدند. در مرحله نخست با استفاده از ماتریس همبستگی پیرسون، همبستگی آماری بین متغیرهای کانه‌ساز منطقه با هم محاسبه شد. بر این اساس، جفت عناصر سرب - روی (۰/۸۷)، نقره – بیسموت (۰/۸۵)، روی – بیسموت (۰/۸۳)، کادمیم – بیسموت (۰/۸۱)، سرب – بیسموت (۰/۸۰)، روی – کادمیم (۰/۸۰)، نقره – کادمیم (۰/۷۶)، سرب - کادمیم (۰/۶۹)، مس – نقره (۰/۶۷) و مس – آهن (۰/۶۵) دارای ارتباط معنادار در سطح ۰/۰۱ و زوج عناصر نقره – روی (۰/۶۱) و نقره – سرب (۰/۴۹) دارای ارتباط معنادار در سطح ۰/۰۵ بوده‌اند. آرسنیک همبستگی معناداری با سایر عناصر کانه‌ساز ندارد و کانسارهای فلزی منطقه وابسته به آرسنیک نیستند (جدول ۴ و شکل ۷ الف).

در مرحله دوم برای شناسایی ارتباط زایشی عناصر کانه‌ساز و تعیین ملاکی برای رده‌بندی آن‌ها بر اساس تشابه درون-گروهی و اختلاف بین‌گروهی، از روش آماری ارتباط چند-متغیره‌ی تجزیه خوشه‌ای با اساس از روش خوشه‌بندی وارد استفاده شد. بر پایه نمودار درختی تجزیه خوشه‌ای (شکل ۷ ب)، عناصر مورد بررسی در ۵ خوشه قرار دارند. خوشه نخست شامل Sb، خوشه دوم شامل Cu و Fe، خوشه سوم شامل As، خوشه چهارم شامل Ag، Bi و Cd و خوشه پنجم شامل Zn و Pb است. هم‌گروهی عناصر خوشه‌های دوم، چهارم و پنجم با همبستگی معنادار جفت عناصر در ماتریس همبستگی پیرسون همخوانی دارد. قرارگیری آرسنیک به تنهایی در خوشه سوم، نبود وابستگی معنادار آن با سایر عناصر کانه‌ساز منطقه را تایید می‌کند. نتایج تحلیل خوشه‌ای و انطباق آن با همبستگی عناصر، می‌تواند نشان‌دهنده هم خاستگاه بودن عناصر یک گروه باشد و به عنوان ردیاب و معرف کانی‌سازی استفاده شود، به طوری که تشابه خاستگاه و همبستگی عناصر مس و آهن با همبرزایی کانی‌های کالکوپیریت و پیریت توجیه‌پذیر است. حضور سرب و همبستگی و ارتباط زایشی آن با عنصر روی را می‌توان با وجود کانی گالن در منطقه در ارتباط دانست.

جدول ۴ ضرایب همبستگی پیرسون برای ۹ عنصر شاخص کانه‌ساز در کانسار آق‌دره.

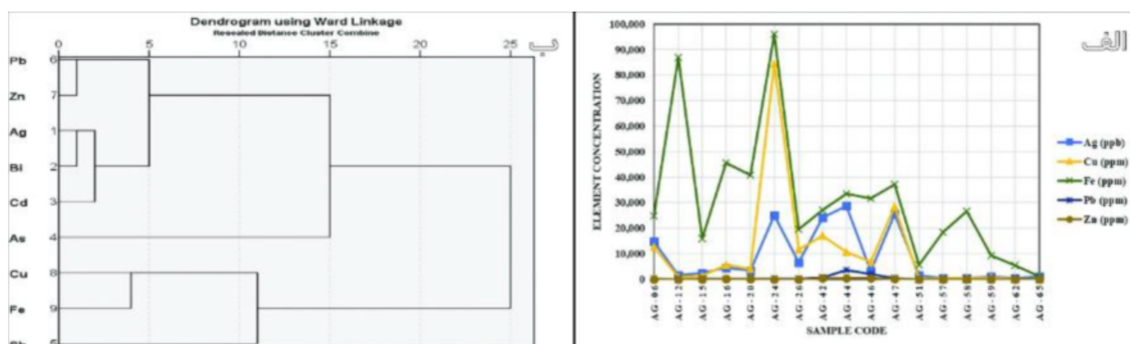
	Ag	Cu	Pb	Zn	Sb	As	Bi	Fe	Cd
Ag	۱								
Cu	**۰/۶۷۱	۱							
Pb	*۰/۴۸۷	۰/۰۴۴	۱						
Zn	*۰/۶۰۵	۰/۰۶۳	**۰/۸۷۱	۱					
Sb	۰/۴۷۴	۰/۴۴۲	۰/۰۹۰	۰/۰۱۸-	۱				
As	۰/۱۵۱	۰/۱۵۲-	۰/۱۳۶	۰/۱۷۸	۰/۲۳۹-	۱			
Bi	**۰/۸۴۶	۰/۳۴۵	**۰/۸۰۲	**۰/۸۳۲	۰/۲۳۴	۰/۲۸۴	۱		
Fe	۰/۳۴۷	**۰/۶۴۹	۰/۰۶۲	۰/۰۷۵	۰/۱۰۵	۰/۰۰۴-	۰/۱۷۵	۱	
Cd	**۰/۷۶۱	۰/۱۷۷	**۰/۶۸۷	**۰/۸۰۱	۰/۱۱۴	۰/۳۴۳	**۰/۸۱۰	۰/۰۶۳	۱

× تطابق قابل توجه با سطح معناداری ۰/۰۵

××تطابق قابل توجه با سطح معناداری ۰/۰۱

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]



شکل ۷ نمودارهای زمین‌شیمی کانسار آق‌دره: الف) نمودار هم‌روندی عناصر کانه‌ساز مس، سرب، روی، نقره در رگه‌های کوارتز – سولفیدی و ب) نمودار درختی تجزیه خوشه‌ای ۹ عنصر شاخص کانه‌ساز با استفاده از روش ورد در نرم افزار SPSS.

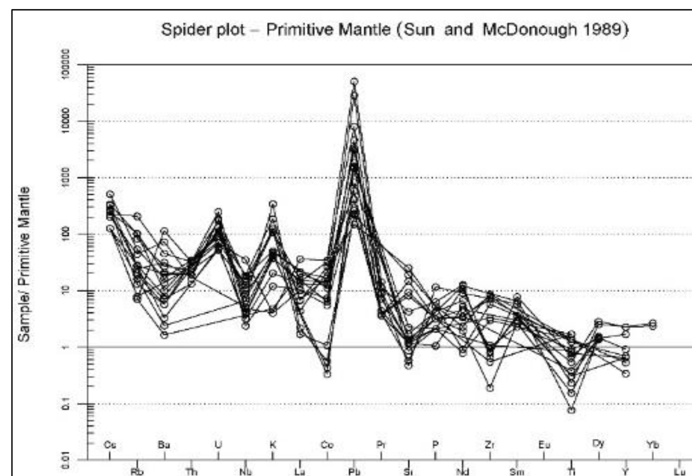
برای تعیین روند تغییر عناصر کمیاب، مقادیر آن‌ها در ۱۷ نمونه (جدول ۳) بر پایه از داده‌های مرجع [۵۰] با استفاده از نرم‌افزار GCDKit به مقادیر گوشته اولیه بهنجار شد. نمودار عنکبوتی چندعنصری این نمونه‌ها غنی‌شدگی نسبی عناصر سنگ‌دوستِ بزرگ‌یون و عناصر خاکی نادر سبک مانند K، Rb، Cs، Ba، La، Pb و تا حدی Ce و تهی‌شدگی نسبی عناصر با شدت میدان بالا مانند Ti، Nb، Zr و P را نشان داد (شکل ۸). بی‌هنجاری مثبت LILE و LREE و بی‌هنجاری منفی HFSE از ویژگی‌های بارز کمان‌های ماگمایی و فعالیت ماگمایی وابسته با منطقه فروانش و نشان‌دهنده سیال‌هایی با خاستگاه سنگ‌کره‌ی فرورانده بر غنی‌سازی این عناصر در ماگماست [۵۱، ۵۲].

افزایش عنصر K می‌تواند به دلیل ورود آن به شبکه کانی‌هایی مانند فلدسپار قلیایی در مراحل پایانی جدایش ماگمایی در سنگ‌های اسیدی و یا وارد شدن آن در ساختار سریسیت و ایلیت در سنگ‌های دگرسان منطقه باشد (جدول ۱). افزایش عنصر Ba در بیشتر نمونه‌ها دیده می‌شود که با توجه به اندازه یونی مشابه و بار یونی بیشتر، امکان اسیر شدن آن توسط عنصر K در ساختار فلدسپار قلیایی و بیوتیت وجود دارد و می‌تواند در پلاژیوکلاز پذیرفته شود. فراوانی این دو عنصر بیانگر نقش پوسته قاره‌ای در تشکیل ماگمای مولد است [۴۵]. این فراوانی نسبی در واحدهای سنگی منطقه حفظ شده است (شکل ۸). غنی‌شدگی بالای عنصر Pb به دلیل زایش گالن در کانی‌سازی درونزاد و حضور عنصر Pb در ساختار سولفید سرب است. بی‌هنجاری مثبت Pb در سنگ‌های منطقه می‌تواند با دگرنهادی گُوهِ گوشته‌ای توسط سیال‌های ناشی از پوسته اقیانوسی فرورونده و یا آلایش ماگما با سنگ‌های پوسته قاره‌ای ارتباط داشته باشد [۵۳]. تهی‌شدگی Sr می‌تواند ناشی از فرایند تبلور جدایشی کانی پلاژیوکلاز [۵۴] و شسته شدن Ca در سنگ‌های دگرسان منطقه باشد. تهی‌شدگی Nb و Ti می‌تواند دلیل فعالیت ماگمایی وابسته به ناحیه فروانش [۵۵، ۵۶]، اثر پوسته قاره‌ای در فرایندهای ماگمایی [۵۵، ۵۷ و ۵۸]، مقادیر پایین این عناصر در خاستگاه [۵۹] و پایداری فازهای دارای این عناصر در فرایند ذوب بخشی و یا جدایش آن‌ها طی فرایند جدایش ماگمایی [۵۹] باشد. افت نسبی این عناصر در سنگ‌های آتشفشانی منطقه بیانگر اثر پوسته قاره‌ای در فرایندهای ماگمایی و تشکیل واحدهای سنگی منطقه است و ویژگی‌های کمان‌های ماگمایی کرانه قاره‌ای را نشان می‌دهد [۶۰]. تهی‌شدگی Nb با الگوی عناصر کمیاب توده‌های آذرین کمان قاره‌ای و شاخص ماگماهای آهکی- قلیایی همخوانی دارد [۴۵]. این الگوی نسبی در سنگ‌های دگرسان منطقه نیز دیده شده است (شکل ۸). تهی‌شدگی Nb به همراه غنی‌شدگی Pb نشانه‌ای از ماگماهای آتشفشانی جزایرکمانی و ماگماهای برآمده از پوسته قاره‌ای است [۵۳]. در مجموع، ماگمای اولیه سنگ‌های منطقه به احتمال بسیار در ارتباط با یک محیط فرورانشی بوده که سپس با پوسته قاره‌ای آلایش یافته و سنگ‌های آذرین با رده‌بندی آهکی قلیایی را تشکیل داده است.

بررسی میانبارهای سیال

بررسی میانبارهای سیال از راه‌های شناسایی خاستگاه [۶۱] و روشی دقیق و مستقیم برای براورد دمای تشکیل کانسار بوده [۶۲] و اطلاعات مفیدی پیرامون روابط سیال ها با کانی‌زایی ارائه می‌دهد [۶۳، ۶۴]. میانبارهای سیال برای ریزدماسنجی، تعیین نوع نمک‌ها و مقدار شوری محلول کانه‌دار در کانسارهای مختلف بررسی می‌شوند. البته، نخست نیاز به سنگ‌نگاری و بررسی‌های دقیق همبرزایی است و باید کانی‌هایی انتخاب شوند که تشکیل آن‌ها از محلول کانه‌دار تایید شده باشد [۴۲].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

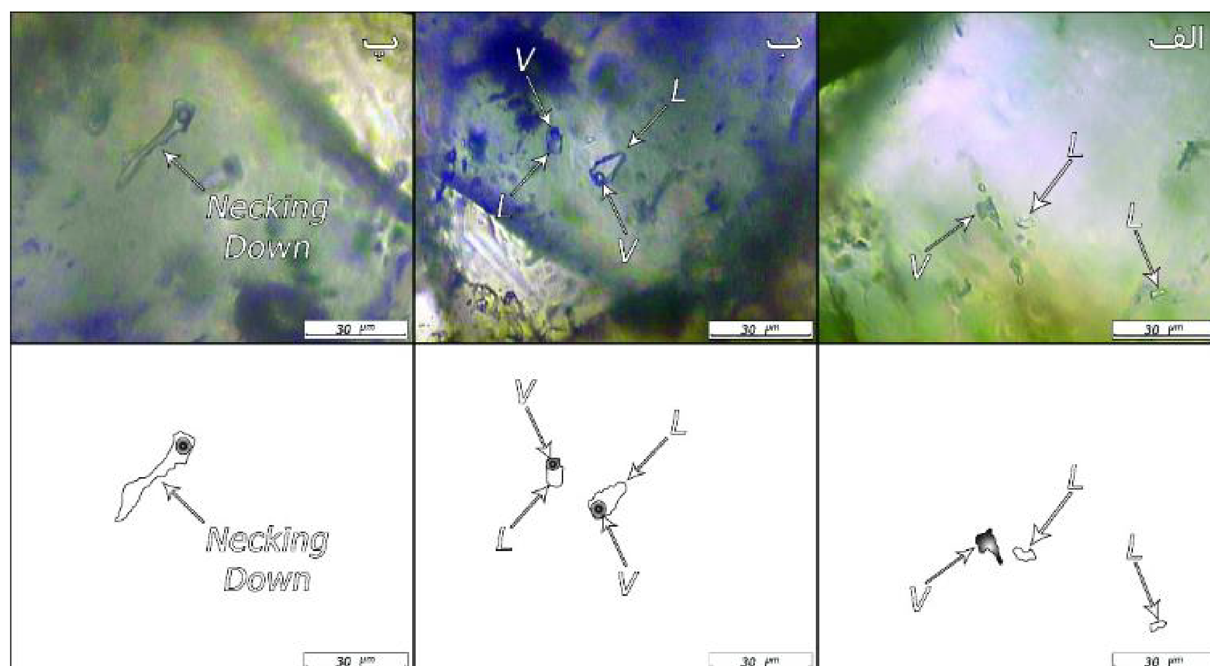


شکل ۸ نمودار عنکبوتی مقادیر عناصر کمیاب بهنجار شده به گوشته اولیه [۵۰] برای نمونه‌های کانسار مس آق‌دره

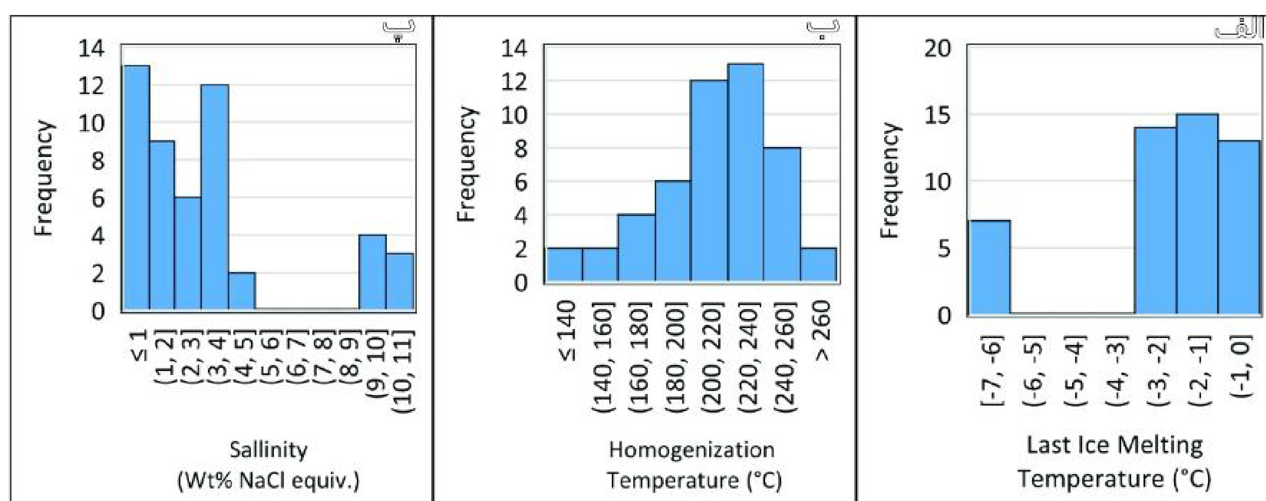
سنگ‌نگاری: برای انتخاب نمونه‌های مناسب ریزدماسنجی، مقاطع دوبر صیقلی از رگه‌های کوارتز کانه‌دار منطقه که مهم‌ترین همبر کانی‌زایی و وابسته به سیال کانه‌ساز است، تهیه و سنگ‌نگاری شد. بر اساس رده‌بندی مرجع [۶۳-۶۵]، میانبارهای سیال مقاطع مورد بررسی، از نوع تک‌فازی مایع (L؛ شکل ۹ الف)، تک‌فازی بخار (V؛ شکل ۹ الف) و دوفازی غنی از مایع (L+V؛ شکل ۹ ب) هستند و شواهدی از حضور فاز جامد (S) یا دی‌اکسید کربن مایع (L_{CO2}) در میانبارها دیده نشد. فراوانی میانبارهای تک‌فازی مایع بیش از دو نوع دیگر است و بیشتر به صورت انباشتی شناسایی شده‌اند. حضور میانبارهای تک‌فازی مایع، تک‌فازی بخار و دوفازی غنی از مایع در یک رخداد نشان‌دهنده جوشش و سرانجام کانی‌زایی است [۶۶]. در برخی از مقاطع، پدیده باریک‌شدگی دیده شد (شکل ۹ پ) که یک پدیده عمومی در محیط‌های گرمابی است [۶۷] به احتمال بسیار میانبارهای تک‌فازی مایع برآمده از آن بوده‌اند. تقسیم‌شدن میانبارهای بزرگ‌تر به اندازه‌های کوچک‌تر موجب تغییر در ترکیب تک‌تک آن‌ها در مقایسه با میانبار اولیه می‌شود [۳]. از این رو برای ریزدماسنجی و فشارسنجی از میانبارهای تک‌فازی مایع استفاده نشد. میانبارهای غنی از مایع بهترین نوع میانبارها برای ریزدماسنجی هستند. فراوانی این میانبارها به صورت منفرد و انباشتی در مقاطع مورد بررسی مناسب بوده است. اندازه میانبارهای غنی از مایع بین ۵ تا ۳۶ میکرون متغیر است، امّا اغلب کوچکتر از ۲۰ میکرون هستند (شکل ۹). میانبارها در مقاطع مورد بررسی به ترتیب فراوانی به شکل‌های نامنظم میله‌ای، پهن، کروی و بیضوی دیده شدند.

ریزدماسنجی: در بررسی‌های ریزدماسنجی، نخست انجماد و سپس گرمایش بر ۴۹ میانبار دوفازی غنی از مایع انجام شد. میانبارهای ثانویه کاذب هرچند، ترکیب شیمیایی و ریزدماسنجی مشابه میانبارهای اولیه از خود نشان می‌دهند [۶۸]، ولی بدلیل اندازه بسیار کوچک، بررسی نشدند. میانبارهای سیال برای انجماد کامل تا ۱۰۵- درجه سانتی‌گراد سرد شدند و سپس با گرمایش تدریجی، به ترتیب نخستین دمای ذوب‌شدگی یا نقطه همگدازی (T_e)، دمای ذوب آخرین بلور یخ (T_m) و دمای همگن‌شدگی (T_h) در آن‌ها اندازه‌گیری شد. نقطه همگدازی، رابطه مستیمی با ترکیب نمک موجود در میانبارهای سیال دارد [۶۳] و برای سامانه H_2O-NaCl حدود ۲۰٫۸- درجه سانتی‌گراد است [۶۹، ۷۰]. این دما در میانبارهای کانسار آق‌دره حدود ۲۱- درجه سانتی‌گراد بوده و بنابراین بسته‌شدن میانبارهای سیال در یک سامانه گرمابی H_2O-NaCl ممکن است. دمای ذوب آخرین بلور یخ بین ۷- تا ۰٫۴- درجه سانتی‌گراد، با بیشترین فروانی در گستره ۱- تا ۲- درجه سانتی‌گراد (شکل ۱۰ الف) و گستره دمای همگن‌شدگی بین ۱۴۰ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد، با بیشترین فراوانی در گستره ۲۰۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (شکل ۱۰ ب). مقدار شوری بر اساس دمای ذوب آخرین بلور یخ و از رابطه مراجع [۷۱، ۷۲]، بین ۰٫۷ تا ۱۱ درصد وزنی NaCl محاسبه شد (شکل ۱۰ پ). ناپیوستگی در نمودار فراوانی شوری می‌تواند به دلیل محدودیت در تعداد داده‌ها یا اثر دو گونه سیال در منطقه باشد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]



شکل ۹ تصاویر میکروسکوپی میانبارهای سیال در کانی کوارتز کانسار آق‌دره: الف) تک‌فازی مایع (L) و تک‌فازی گازی (V). ب) دو فازی غنی از مایع (L+V) و پ) پدیده باریک‌شدگی.



شکل ۱۰ نمودارهای ستونی ریزدماسنجی میانبارهای سیال کانسار آق‌دره الف) فراوانی دمای ذوب آخرین بلور یخ، ب) فراوانی دمای همگن‌شدگی و پ) فراوانی شوری بر اساس مراجع [۷۱، ۷۲]

خاستگاه کانسار: کانه‌سازی با عواملی چون دما، فشار، pH و اثر آب‌های جوی کنترل می‌شود [۷۳]. شرایط کانه‌زایی و شباهت-های کانسار منطقه با سایر کانسارهای معروف دنیا، با قرار دادن داده‌های شوری و دمای همگن‌شدگی در نمودار مرجع [۷۴]، مقایسه شد. بر این اساس، کانسار آق‌دره در گروه کانسارهای فراگرمایی قرار دارد (شکل ۱۱ الف).

در روند تکامل سیال های گرمابی [۷۴] در کانسار آق‌دره، پدیده جوشش و سردشدگی رخ داده است (شکل ۱۱ ب). رخداد جوشش و کاهش دما سبب ته‌نشست فلزات از لیگاندهای بی‌سولفیدی می‌شوند [۷۵]. در سامانه‌های فراگرمایی، فلزات توسط لیگاندهای بی‌سولفیدی [۷۶] و کلروری [۷۷، ۷۸] حمل می‌شوند و جوشش و آمیختگی سیال

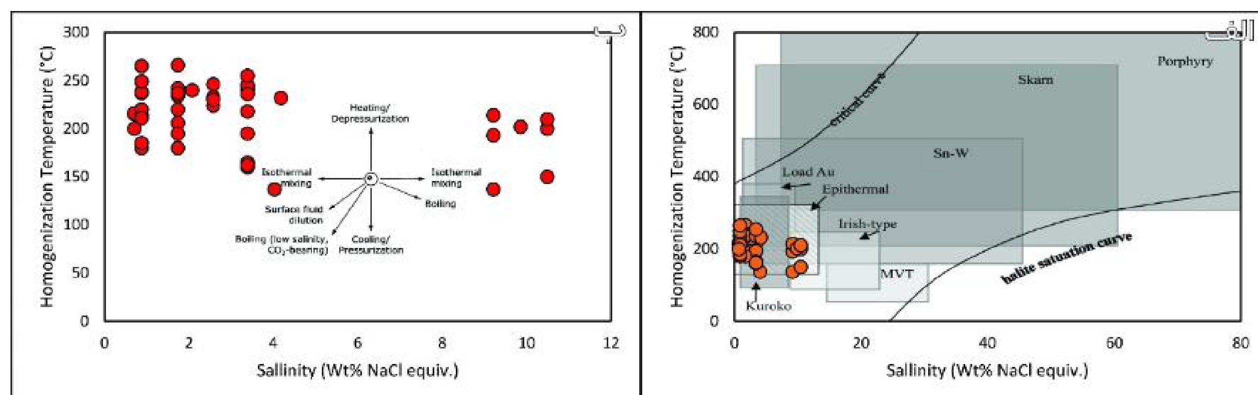
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

دو عامل مهم ته‌نشینی کانی‌های فلزی در این سامانه‌ها هستند [۵، ۷۹]. در اثر واکنش سیال کانه‌ساز با فلدسپارها، pH محلول افزایش یافته و با مصرف H^{+}، فلزات قلیایی و قلیایی خاکی به درون سیال آزاد می‌شوند. همچنین، غلظت سیال در اثر ورود آب‌های جوی کاهش یافته و در نتیجه‌ی واکنش Ca^{2+} اضافه‌شده به سیال با Cl، سولفیدهای فلزی از لیگاند کلروری ته‌نشین می‌شوند [۷۵] و این فرایند نسبت به کاهش دما نقش مهمتری در ته‌نشست کانسار دارد. در فرایند رقیق‌شدگی و سردشدن سیال کانه‌ساز کانسار آق‌دره، به احتمال بسیار تکامل پس رونده‌ای رخ داده که در آن، فاز اولیه‌ی دمای بالا با گذشت زمان، پیشرفت واکنش‌ها و افزایش رقیق‌شدگی بر اثر نفوذ آب‌های فرورو، با کاهش دما همراه شده [۸۰] و نهشت مواد معدنی را در پی داشته است. فرایند جوشش با ویژگی‌هایی مانند همزیستی میانبارهای تک‌فازی بخار و میانبارهای غنی از مایع، همگن‌شدگی برخی از میانبارها به فاز بخار، نبود مواد فرار در میانبارها و نهشت بلورهای درشت کوارتز با بافت حفره‌ای در رگه‌های سیلیسی، در کانسار آق‌دره قابل تشخیص است. روند تکامل سیال کانه‌ساز و گسستگی نمودار فراوانی شوری تبلور دو دسته از کانی‌های کوارتز مربوط به دو نسل از سیال کانه‌ساز را در منطقه توجیه می‌کند.

برآورد چگالی، فشار و ژرفا: با ترکیب داده‌های دمای همگن‌شدگی و مقدار شوری میانبارها بر نمودار خطوط هم‌چگال، می‌توان چگالی سیال را بدون توجه به شرایط به‌دام افتادن آن تعیین کرد [۷۴]. با استفاده از خطوط هم‌چگال در نمودار شوری-دمای همگن‌شدگی [۸۱]، چگالی سیال میانبارهای کانسار آق‌دره در گستره ۰/۷ تا ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب برآورد شد (شکل ۱۲ الف).

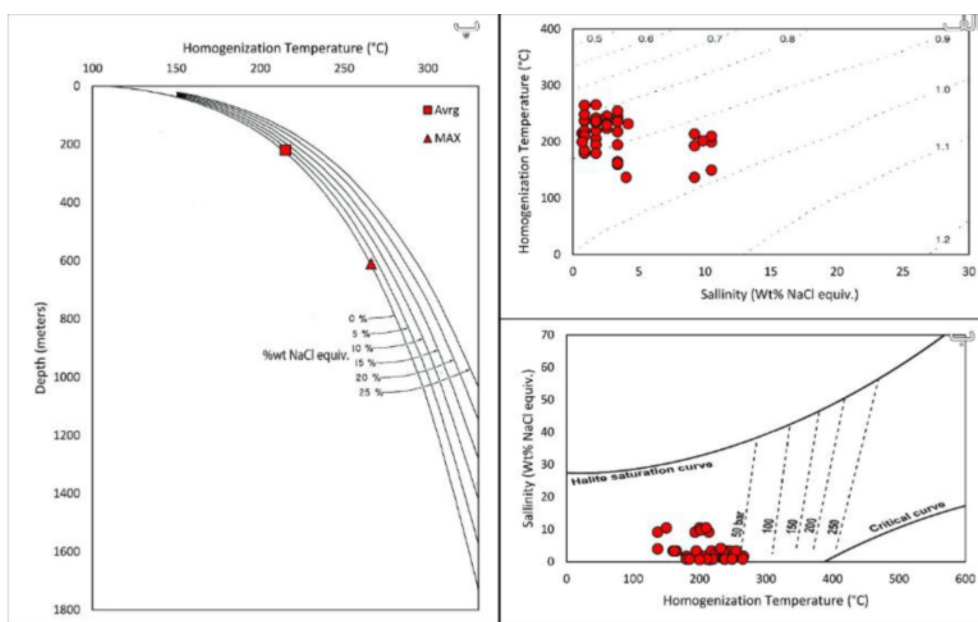
برای محاسبه فشار در شرایط رخداد جوشش، نیازی به تصحیح دما نیست و دمای همگن‌شدگی برابر با دمای تشکیل کانسار است [۸۲]. بر این اساس، بیشینه فشار سیال با استفاده از دمای همگن‌شدگی و نمودار مرجع [۸۳]، برابر با ۷۵ بار محاسبه شده است (شکل ۱۲ ب) و همه میانبارهای سیال زیر منحنی اشباع NaCl قرار دارند.

ژرفای تشکیل کانسارهای فراگرمایی براساس حضور میانبارهای هم‌زیست غنی از مایع و غنی از بخار و با استفاده از ویژگی‌های تعادل فازی (دمای همگن‌شدگی با منحنی عمق) برآورد می‌شود. با توجه به وجود شواهد جوشش، برای تعیین ژرفا از میانگین دمای همگن‌شدگی و شوری استفاده شد [۸۴، ۸۵]. با قرار دادن این مقادیر بر نمودار مرجع [۸۶]، متوسط به‌دام افتادن سیال کانه‌ساز حدود ۲۵۰ متر و بیشینه ژرفای آن حدود ۶۵۰ متر به دست آمد (شکل ۱۲ پ). این یافته با عمق کانسارهای فراگرمایی که به‌طور معمول کمتر از ۱ کیلومتر است همخوانی دارد. کانسارهای نوع فراگرمایی اغلب در نزدیکی سطح زمین و در دمای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد شکل می‌گیرند [۸۷].



شکل ۱۱ الف) نمودار تعیین خاستگاه ژنز کانسار آق‌دره بر اساس شوری و دمای همگن‌شدگی میانبارهای سیال [۷۴]، ب) نمودار فرایند تکامل سیال کانه‌ساز کانسار آق‌دره بر اساس روند معمول شوری و دمای‌همگن‌شدگی [۷۴].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]



شکل ۱۲ نمودارهای تعیین چگالی، فشار و ژرفا برای میانبارهای سیال کانسار آق‌دره: الف) نمودار شوری- دمای همگن‌شدگی با خطوط هم چگال برای تعیین چگالی سیال به دام‌افتاده در میانبارها [۸۱]، ب) نمودار دمای همگن‌شدگی-شوری به همراه منحنی‌های بحرانی و خطوط هم‌فشار برای تعیین فشار سیال [۸۳]، پ) نمودار دمای همگن‌شدگی-ژرفا به همراه خطوط هم شوری برای تعیین ژرفای به تله افتادن میانبارهای سیال [۸۶].

برداشت

اصلی‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی در کانسار مس آق‌دره واحدهای سنگی آندزیتی، آندزی‌بازالتی، سینیتی و توف‌هایی با سن ائوسن و معادل سازند کرج هستند که از نظر سری ماگمایی در گستره نیمه قلیایی قرار دارند. آندزیت‌ها و رگه‌های سیلیسی منتشر شده در توف‌های منطقه با کانه‌زایی همراه بوده و فضاهای خالی اغلب رگه‌ها با کانی‌های سولفیدی پُر شده‌اند. ورود محلول‌های گرمابی به این رگه‌ها و نفوذ توده‌های آتشفشانی، دگرسانی‌های گسترده سیلیسی و هاله‌های دگرسانی آرژیلیک، آلونیتی و پروپلیتیک را در منطقه ایجاد کرده است. در این شرایط، دو مرحله کانی‌زایی درونزاد و برونزاد رخ داده که طی آن‌ها، کانی‌های اصلی کالکوپیریت، پیریت و گالن، کانی‌های ثانویه مالاکیت، آزوریت و گوتیت، کانی‌های باطله کواتز، باریت و کلسیت و همچنین طلا و نقره نهشته شده‌اند. کالکوپیریت و مالاکیت از فراوان‌ترین کانی‌های مس‌دار منطقه هستند. تشکیل کانی‌های کربناتی (مالاکیت و آزوریت)، وجود پهنه برونزاد اکسیدی و حضور کالکوپیریت‌های هوازده‌ی در حال تجزیه به کانی‌های اکسید آهن آبدار، وجود پهنه برونزاد سولفیدی ثانویه را تایید می‌کنند. همبرزایی کالکوپیریت و پیریت با نتایج تحلیل خوشه‌ای همخوانی دارد و بر این اساس، خاستگاه عناصر مس و آهن مشابه تشخیص داده شد. بر پایه ماتریس همبستگی پیرسون، در منطقه، سرب و روی بیشترین همبستگی با سطح اطمینان ۹۹٪ را داشته‌اند. نمودار درختی با روش خوشه‌بندی ورد نیز ارتباط زایشی جفت عناصر مس – آهن و سرب – روی را نشان داد.

بی‌هنجاری‌های مثبت LILEها، LREEها و بی‌هنجاری‌های منفی HFSEها، به ویژه افزایش عناصر Ba ،K و Pb و تهی‌شدگی عناصر Nb و Ti نشان می‌دهد که پوسته قاره‌ای در تشکیل ماگمای مولد سنگ‌های منطقه در یک محیط فرورانشی نقش داشته و این ماگما پس از آلایش با پوسته قاره‌ای، سنگ‌های آتشفشانی با طبیعت آهکی- قلیایی را ایجاد نموده است.

ترکیب یافته‌های میانبارهای سیال، شامل شوری، دمای همگن‌شدگی و ژرفای تشکیل میانبارها، با شواهد صحرایی و نتایج آزمایشگاهی از جمله کانه‌سازی در سنگ میزبان آتشفشانی، در برگرفته شدن کانسار توسط سنگ‌های آتشفشانی نیمه‌عمیق، بافت جانشینی و پُرکننده فضاهای خالی و ساخت کانه‌ها، گستره‌های دگرسانی، توالی همبری، انباشت عناصر فلزی و نبود کانی‌های دمای بالا و همچنین مقایسه با سایر کانسارهای مشابه (جدول ۵) [۸۸، ۸۹]، کانسار مس آق‌دره را در رده کانسارهای فراگرمایی نوع رگه‌ای قرار می‌دهد.

سامانه‌های فراگرمایی در مناطق فرورانش می‌توانند ارتباط زایشی نزدیکی با سامانه‌های مس پورفیری داشته باشند [۹۰-۹۲] و منطقه مورد بررسی به احتمال بسیار بر یک کانسار پورفیری پنهان قرار دارد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

جدول ۵ مقایسه کانسار آق‌دره با کانسارهای فراگرمایی نوع رگه‌ای [۸۸، ۸۹].

ویژگی	کانسارهای فراگرمایی رگه‌ای	کانسار مس آق‌دره
موقعیت زمین ساختی	لبه صفحه های همگرا	پهنه برخورد کرانه قاره و کمان قاره‌ای
سنگ میزبان	آندزیت، ریولیت، توف، داسیت	آندزیت، آندزیت بازالت، سینیت، توف
سن تشکیل	بیشتر سنوزوئیک	ائوسن
عمق تشکیل	کمتر از ۴ کیلومتر	کمتر از ۱ کیلومتر
دگرسانی‌های رایج	سریسیتی، آدولاریا و آرژیلیک متوسط	سیلیسی، آرژیلیک، پروپلیتیک، سریسیتی و آلونیتی
بافت	پُرکننده فضای خالی و رگه‌ای	اغلب پُرکننده فضای خالی
کانی‌شناسی	اسفالریت، گالن، کالکوپیریت و پیریت	کالکوپیریت، پیریت، گالن، مالاکیت، آزوریت، گوتیت
فلزات اصلی	Pb-Zn-Cu (Au±Ag)	Cu-Pb-Zn-Fe-Au-Ag
خاستگاه سیال های کانه‌ساز	آب‌های جوی و ماگمایی	آب‌های جوی و ماگمایی

قدردانی

این پژوهش با حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه و پشتیبانی مالی سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران انجام شده است که از همکاری‌های همه‌جانبه این دو سازمان تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین نگارندگان از نظرها و پیشنهادهای ارزنده و سازنده‌ی داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[1] Khoei N., Qorbani M., Tajbakhsh P., *"Copper deposits in Iran",* Geological Survey of Iran Press, (1999) 421 p.

[2] Irannejad M., Salari Rad M., and Mohammadi M.A., *"Comparison of Economics of Cementation and Solvent Extraction for Recovery of Copper from Tarom Sofla Oxidized Copper Leach Solutions"*, Scientific Quarterly Journal Geosciences 66 (2007) 68-73.

[3] Mirzaei Raini R., Ahmadi A., Mirnejad H., *"Mineralogy and fluid inclusion studies in Mahour copper deposit, east of Lut block, Central Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 20:2 (2012) 307-318.

[4] Feyzi F., Arian M., *"The Role of Building Controllers in the Formation of Copper Ore Deposits on Saein Qaleh 1:50000 Map"*, Journal of Basic Sciences Islamic Azad University 81 (2012) 1-10.

[5] Zamanian H., Rahmani Sh., Jannessary M.R., Zareii Sahamiieh R., Borna B., *" Ore-genests study of The Cu-Au vein-type deposit in The Taron-Granitoid (North Zanjan) based on mineralogical, geochemical and fluid inclusion evidences"*, Scientific Quarterly Journal Geosciences 98 (2016) 255-282.

[6] Bazargani-Guilani K., Parchakani M., *" Metalogenic Properties of Barik-Ab Pb-Zn (Cu) Ore Deposit with Acidic Tuff Host-Rock, west Central Alborz, Northwest of Iran"*, Scientific Quarterly Journal Geosciences 78 (2011) 97-104.

[7] Farid-Asl V., *"Study of the genesis of Mari copper deposit (north of Zanjan) with special emphasis on enrichment and supergene oxidation processes"*, M.Sc. thesis, Tabriz university (2012) 121 p.

[8] Hosseyny-Ekhtiarabady M., Babakhani A.R., Sahandi M.R., Moosavi E., *"Abhar 1:100000 geological sheet"*, Geological Survey of Iran (2017).

[9] Rahmani A., *"Economic Geology Survey of Khalifa-Lu Deposition (North of Khorramdareh, Zanjan Province)"* M.Sc. thesis, Tabriz university (2015) 182 p.

[10] Tadayon Eslami A., *"Evaluation of mineral abilities of Zanjan quadrangle map 1:250000"*, Geological Survey of Iran Report (1990) 76 p.

[11] Hirayama K., Samimi M., Zahedi M., Hushmandzadeh A.M.,*"Geology of Tarom district western part (Zanjan area) geology Survey of Iran Rep"*, Geological Survey of Iran Report 8 (1966) 31 p.

[12] Bazin D., Hubner H., *"Copper deposits in Iran"*, Geological Survey of Iran Report 15 (1969) 232 p.

[13] Iwao, S.H., Hushmand-zadeh A., *"Stratigraphy and petrology of the low-grade regionally metamorphosed rocks of the Eocene Formation in the Alborz Range, North of Tehran, Iran"*, The Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists 65:6 (1971) 265-285.

[14] Tadayon Eslami A., *"Systematic mineral exploration report in Zanjan quadrangle map in Chal-Kuhian area"*, Geological Survey of Iran (1984) 1-45.

[15] Peyrovan H., *"Geochemical survey of alteration zones of Tarom region"*, PhD thesis, Islamic Azad University Science and Research Branch (2003) 50-160.

[16] Peyrovan H., *"Mineralogical and geochemical classification of alteration rocks in Tarom area"*, Proceedings of the 9th Iranian Geological Society Conference (2004) 427-440.

intrusive bodies of the region", the fourth conference of the Iranian Geological Society, Tabriz (2000), 3p.

[30] Riou R., Dupuy C., Dostal J., *"Geochemistry of coexisting alkaline and calc-alkaline volcanic rocks from northern Azerbaijan (N.W. Iran)"*, Volcanology and Geothermal Research 11 (1981) 253-275.

[31] Sillitoe H.R., Hedenquist J.W., *"Linkage between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious- metal deposits"*, Society of Economic Geologist, Special Publication 10 (2003) 315-343.

[32] Clark G.C., Davis R.G., *"Explanatory text of the Bandar-e-Pahlavi quadrangle map 1:250000"*, Geological Survey of Iran (1975) 198 p.

[33] Eftekharnejad J., Hajiyan J., Hirayama D.K., Hoshmandzadeh A., Nabavi M.H., Samimi M., Stoklin Y., Zahedi M., Alavi Naeini M., *"Khodbandeh-Soltaniyeh 1:100000 geological sheet"*, Geological Survey of Iran (1995).

[34] Ganji A.R., *"Mineralogical investigation of hydrothermal alterations in the middle part of Tarom Mountains – Northwest of Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 13:1 (2005) 121-133.

[35] Whitney D.L., Evans B.W., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals"*, American Mineralogist 95 (2010) 85-187.

[36] Darvishzadeh A., Asiyabanha A.,*" The role of pyroclastic rocks in the preferential expansion of hydrothermal alteration in the Abtrash volcanic zone"*, Scientific Quarterly Journal Geosciences 38 (2001) 49-59.

[37] Hajalilo B., *"Tertiary metallogeny in West Alborz-Azarbaijan (Miyaneh-Siahrood) with special attitude toward Hashtjin area"*, PhD thesis, Shahid Beheshti University (2001) 275 p.

[38] White N.C., Hedenquist J.W., *"Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration"*, SEG Newsletter 23 (1995) 8–13.

[39] Shahabpour J., *"Economic geology"*, Shahid Bahonar Univercity of Kerman 315 (2011) 547 p.

[40] Baker T., Bertelli M., Blenkinsop T., Cleverley J.S., McLellan J., Nugus M., Gillen D., *"P-T-X conditions of fluids in the Sunrise Dam gold deposit, Western Australia, and implications for the interplay between deformation and fluids"*, Economic Geology 105 (2010) 873-894.

[41] Pirajno F.,*"Hydrothermal processes associated with meteorite impacts"*, Springer Netherlands (2009) 759 p.

[42] Kazempour M., Hidarian Shahri M., Malekzadeh Shafaroudi A., *"Mineralization, fluid inclusion and geochemical studies and interpretation of IP/RS data in Freezi prospect area, northeast Iran"*, Iranian Journal of

[17] Hajalilo B., *"Investigation of Pb, Zn and Cu mineralization in Northwestern Zanjan"*, Third Annual Conference of the Iranian Geological Society (2006) 234-240.

[18] Jahandideh-Kazempour K., *"The study of economic geology of the Abbas Abad polymetallic ore deposit (Tarom Sofla, the NW of Qazvin province, Iran)"*, M.Sc. thesis, Islamic Azad University Lahijan branch (2012) 286p.

[19] Miranvari A. S., Calagari A., Siahcheshm K., Sohrabi G., *"Investigation of genesis and fluid origin in Noghduz gold bearing quartz veins, East Azarbaijan Province, northwest of Iran"*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 551-564.

[20] Lecumberri-Sanchez P., Steel-MacInnis M., Bodnar R.J., "*A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance*", Geochim Cosmochim Acta 92 (2012) 14-22.

[21] Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J., "*HOKIEFLINCS-H2O-NaCl: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of* H_2O*–NaCl*", Computer in Geosciences 49 (2012) 334–337.

[22] Nabavi M.H., *"An introduction to geology of Iran"*, Geological Survey of Iran (1355) 109 p.

[23] Hosseinzadeh M.R., Maghfouri S., Moayyed M., Rahmani A., *"Khalifehlu deposit: high-sulfidation epithermal Cu-Au mineralization in the Tarom magmatic zone, North Khoramdareh"*, Scientific Quarterly Journal Geosciences 99 (2017) 179-194.

[24] Guest, B., Guest, A., Axen, G., *"Late Tertiary tectonic evolution of Northern Iran: Acase for simple crustal folding, Global and Planetary Change"*, Geosphere 58 (2007) 435–453.

[25] Stocklin J., *"Structural history and tectonics of Iran: a review"*, American Association of Petroleum Geologists 52 (1968) 1229–1258.

[26] Aghanabati A., *"Magmatic Rocks of Iran. Geological Survey of Iran; Scale 1:2500000, 1 sheet"* Geological Survey of Iran (1990).

[27] Einali M., Alirezai S., Zaccarini F., *"Chemistry of magmatic and alteration minerals in the Chahfiruzeh porphyry copper deposit, south Iran: implications for the evolution of the magmas and physicochemical conditions of the ore fluids"* Turkish Journal of Earth Sciences 23 (2014) 147-165.

[28] Karei M., Gharib F., *"Office-field studies to identify promising ranges of REE's in Zanjan province"*, Applied Research Center of Geological Survey of Iran, (2016) 711 p.

[29] Moayed M., Valizadeh M., *"Petrology and Petrogenesis of the Eocene-Oligocene magmatic band of Tarom region and geobarometric of*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

[55] Wilson M., *"Igneous Petrogenesis: a global tectonic approach"*, Unwin Hyman Ltd, London, (1989) 466 p.
[56] Hongyan G., Sun M., Yuan C., Xiao W., Zhao G., Zhang L., Wong K., Fuyuan W., *"Geochemical, Sr–Nd and Zircon U–Pb–Hf isotopic studies of Late-Subduction"*, Chemical Geology 266 (2009) 364-398.
[57] Nagudi N.O., Koberl C. H., Kurat G., *"Petrography and geochemistry of the Sing granite, Uganda, and implication for its origin"*, Journal of African Earth Sciences 35 (2003) 51-59.
[58] Shang G.K., Satir M., Sieble W., Nasifa E.N., Taubuld H., Liegeoise J.P., Tchoua F.M., *"Geochemistry, Rb–Sr and Sm–Nd systematic: case of the Sangmelima region, Ntem complex, southern Cameroon"*, Journal of African Earth Sciences 40 (2004) 61-79.
[59] Wu F., Jahnb B., Wildec S. A., Lod C. H., Yuie T. F., Lina Q., Gea W., Suna D., *"Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic"*, Lithos, 67 (2003) 191-204.
[60] Richards J. P., *"High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: Just add water"*, Economic Geology 106 (2011) 1075-1081.
[61] Piranjo F., *"Hydrothermal mineral deposits"*, Springer Verlag (1992).
[62] Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnis M., *"Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits, In: Holland H.D. and Turekian K.K. (eds.) Treatise on Geochemistry, Second Edition, vol. 13"*, Elsevier (2014) 119-142.
[63] Shephered T. J., Rankin A.H., Alderton D. H.M., "*A practical guide to fluid inclusion studies*", Blackie, London (1985).
[64] Van den Kerkhof A.M., Hein U.F., *"Fluid inclusion petrography"*, Lithos 55 (2001) 4–27.
[65] Roedder E., "*Fluid Inclusions*", In: Ribbe PE(Ed) Reviews in Mineralogy, 12, Mineralogical Society of America, Washington DC (1984) 644 p.
[66] Symons D.T.A., Symons T.B., Sangster D.F., *"Paleomagnetism of the society Cliff's dolostone and the age of the Nanisivik zinc deposits, Baffin Island, Canada"*, Mineralum Deposita 35 (2000) 672-682.
[67] Bodbar R.J., Reynolds T.J. Kuehn C.A.,*"Fluid inclusion systematics in epithermal in systems"*, Rev. Economic Geology 2, (1985) 73-97.
[68] Karimpour M.H., Saadat S., *"Applied Economic geology"*, University of Ferdowsi Mashhad (2006) 536 p. (in Persian)
[69] Hall D.l., Sterner S.M., Bodnar R.J.,*"Freezing point depression of NaCl-KCl-H_2O solutions"*, Economic Geology 93 (1988) 197-202.
Crystallography and Mineralogy 27 (2), (2019) 265-280.
[43] Dong G., Morrison G., Jaireth S., *"Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication"*, Economic Geology 90 (1995) 1841–1856.
[44] Kouhestani H., Ghaderi M., Zaw K., Meffre S., Emami M.H., *"Geological setting and timing of the Chah Zard breccia-hosted epithermal gold-silver deposit in the Tethyan belt of Iran"*, Mineralium Deposita 47 (2012) 425–440.
[45] Winchester J.A., Floyd P.A., *"Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements"*, Chemical Geology, 20 (1977) 325-343.
[46] Shervais J.W., *"Ti-V plots and the petrogenesis of modern ophiolitic lavas"*, Earth and Planetary Science Letters 59 (1982) 101-118.
[47] Jurkovich I., Garasich V., Hrvatović H., *"Geochemical characteristics of the barite occurrences in the Palaeozoic complex of south-eastern Bosnia and their relationship to the barite deposits of the mid-Bosnian Schist Mountain",* Geologia Croatica 63 (2010) 241–258.
[48] Noguchi T., Shinjo R., Ito M., Takada J., Oomori T., *"Barite geochemistry from hydrothermal chimneys of the Okinawa Trough: insight into chimney formation and fluid/sediment interaction"*, Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 106 (2011) 26–35.
[49] Salari M.A., Biyabangard H., Bomeri M., Dargahi S., *"Petrology and geochemistry of andesitic dykes in the north of Rabor, Kerman province",* Journal of Mineralogical and Petrological 19 (2011) 285-296.
[50] Sun S.S., McDonough W.F., *"Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implications for mantle composition and processes. In: Saunders A.D., Norry A.M., eds., magmatism in ocean basins"*, Geological Society London Special Publications 42 (1989) 313–345.
[51] Kuster D., Harms U., *"Post-collisional potassic granitoids form the southern and northwestern parts of the late Neoproterozoic East African Orogen: a review"*, Lithos 45 (1998) 177-195.
[52] Ulmer P., *"Partial melting in the mantle wedge–the role of H_2O in the genesis of mantle-derived 'arc-related' magmas"*, Physics of the Earth and Planetary Interiors 127 (2001) 215-232.
[53] Hofmann A. W., *"Nb in Hawaiian magmas: constraints on source composition and evolution"*, Chemical Geology 7 (1986) 17-30.
[54] Ebrahimi M., Kouhestani H., Mokhtari M. A. A., Feizi M., *"Petrology and geochemistry of the Aqkand acidic volcanic rocks and perlites, North of Zanjan"*, Scientific Quarterly Journal Geosciences 101 (2016) 99-110.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.2.1.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.2.269]

[70] Robb L., *"Introduction to ore forming processes"*, Blackwell publishing. British Library (2005).

[71] Bodnar R. J., *"Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solution",* Geochimica, et Cosmochimica Acta 57 (1993) 683-684.

[72] Bodnary R.H., Vityk M.O., *"Interpretation of microthermometric data for H_2O-NaCl fluid inclusion, in De Vivo, B., and Frezootti, M.L., eds., Fluid inclusion in minerals: Methods and applications: International mineralogical association, Short course of the working group"*, Inclusions in minerals (1994)117-130.

[73] Sorby H., *"On the microscopic structure of crystals indicating the origin of minerals and rocks"*, Journal of Geological Society, London (1980).

[74] Wilkinson J. J., *"Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits"*, Lithos 55 (2001) 229-272.

[75] Mehrabi B., Ghasemi Siyani M., *"Mineralogy and economic geology of Cheshmeh Hafez polymetal deposit, Semnan Province, Iran "*, Journal of Economic Geology 2 (2010) 1-20.

[76] Benning L.G., Seward T.M., *"Hydrosulfide complexing of Au in hydrothermal solutions from 150 to 400 °C and 500 to 1500 bars"*, Geochimica, et. Cosmochimica Acta, 60 (1996) 1849-1871.

[77] Seward T.M., Barnes H.L., *"Metal transport by hydrothermal ore fluids"*, in Barnes, H.L., ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York, John Wiley and Sons (1977) 435-486.

[78] Palyanaova G., *"Physicochemistry modeling of the coupled behaviour of gold and silver in hydrothermal processes, gold fineness, Au/Ag ratios and their possible implication"*, Chemical Geology, 255 (2008) 399-413.

[79] Giggenbach W.F., *"Theorigin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems"*, in Barnez, H.L., Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 3rd ed., New York, wiley Interscience (1997) 737-796.

[80] Rossetti P., Colombo F., *"Adularia-sericite gold deposits of Marmato (Caldas, Colombia): field and petrographic data"*, in: McCaffrey, K.J.W., Lonergan, l., Wilkinson, J.J., Editors. Fractures, Fluid Flow and Mineralization Geological Society of London, Special Publication 155 (1999).

[81] Zhang Y.G., Frantz J.D., *"Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-$CaCl_2$-H_2O using synthetic fluid inclusions",* Chemical Geology 64 (1987) 335-350.

[82] Roedder E., Bodnar R. J., *"Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies"*, Annual Review of Earth and Planetary Sciences 8 (1980) 263-301.

[83] Ahmad S.N., Rose A.W., *"Fluid Inclusions in Porphyry and Skarn Ore at Santa Rita, New Mexico",* Economic Geology 75(1980) 229-250.

[84] Aghajani Marsa S., Emami M. Lotfi M., Gholizadeh k., Ghasemi Siani M., *"Source of polymetal epithermal veins at Nikuyeh district (West of Qazvin) based on mineralogy, alteration and fluid inclusion studies"*, Scientific Quarterly Journal Geosciences 25 (2016) 157-168.

[85] Gharesi M., Rasa I., Yazdi M, *"Investigation of Mazraeh Skarn mineralization, North of Ahar, with an emphasis on fluid inclusion studies",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 26:1 (2018) 229-244.

[86] Haas J.L., *"The Effect of Salinity on the Maximum Thermal Gradient of a Hydrothermal System at Hydrostatic Pressure"* Economic Geology 66 (1971) 940-946.

[87] Hedenquist J.W., *"Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific basin"*, In: Hom, M.K., Editor. Transactions of the Fourth Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, (1987) 513-524.

[88] Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urien E., *"Exploration for epithermal gold deposits. In: Hagemann, S. G., Brown, P. E., (Eds). Gold in 2000"*. Reviews in Economic Geology 13 (2000) 245-277.

[89] Bartwaite R.L., Simpson M.P., Faure K, *"Telescoped porphyry Cu-Mo-Au mineralization, advanced argillic alteration and quartz sulphide gold anhydrite veins in the Thames District, New Zealand"* Mineralium Deposita 36 (2001) 623-640.

[90] Kolb J., Hagemann S., *"Structural control of low-sulfidation epithermal gold mineralization in the Rosario–Bunawan district, east Mindanao ridge, Philippines"*, Mineralium Deposits 44 (2009) 795-815.

[91] Richards J.P., *"Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere"*, Geology 37 (2009) 247–250.

[92] Richards J.P., Spell T., Rameh E., Razique A., Fletcher T., *"High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan"*, Economic Geology 107 (2012) 295-332